

Title	火災の延焼機構とその都市防災施設および土地利用計画への適用に関する研究(Dissertation_全文)
Author(s)	難波, 義郎
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	1984-05-23
URL	http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r5306
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

火災の延焼機構とその都市防災施設
および土地利用計画への適用に関する研究

昭和58年12月

難波義郎

火災の延焼機構とその都市防災施設 および土地利用計画への適用に関する研究

昭和 58 年 12 月

難 波 義 郎

火災の延焼機構とその都市防災施設 および土地利用計画への適用に関する研究

目 次

序 論	1
第 1 編 火災の現況と火災延焼機構の分析	
第 1 章 緒論	5
第 2 章 火災および防火対策の現況	6
2. 1 緒言	6
2. 2 火災の原因	8
2.2.1 平常時火災の出火原因	8
2.2.2 地震時火災の出火原因	10
2. 3 火災による損害	12
2.3.1 全国の火災概況	12
2.3.2 都道府県別の火災損害状況	14
2.3.3 出火率	18
2.3.4 火災延焼に関する考察	18
2. 4 防火対策の現況	22
2.4.1 ソフトの対策	22
2.4.2 ハードの対策	25
2. 5 結言	29
第 3 章 都市火災の延焼モデルに関する研究	31
3. 1 緒言	31

3. 2	従来の研究	31
3.2.1	金原の式	31
3.2.2	土佐林の式	32
3.2.3	東京消防研究会の図	32
3.2.4	浜田・堀内の式	34
3.2.5	保野の式	36
3.2.6	従来の式の検討	37
3. 3	延焼モデルの基本型	38
3.3.1	概説	38
3.3.2	多項式回帰モデル	40
3.3.3	ロジスティック曲線による延焼モデル	43
3.3.4	解析結果の検討	55
3. 4	延焼モデルの提案	57
3.4.1	延焼規模が延焼モデルのパラメータへ与える影響	57
3.4.2	K市およびS市の火災資料による延焼モデルの実用化	60
3. 5	結言	73
第4章	都市火災の延焼阻止効果に関する研究	75
4. 1	緒言	75
4. 2	従来の研究	75
4.2.1	碓井の研究	75
4.2.2	菱田の研究	75
4.2.3	堀内の研究	75
4.2.4	保野の研究	76
4.2.5	高橋の研究	76
4. 3	延焼阻止効果の数学モデル	77
4. 4	モデルによる延焼阻止効果の検討	80
4.4.1	延焼モデルの諸要素について	81
4.4.2	延焼阻止効果について	85
4. 5	年間火災統計によるモデルの検証	89

4.5.1 年間焼失面積の算定方法	89
4.5.2 計算結果	91
4.6 結言	92
第5章 結論	93

第2編 地震時火災危険度を考慮した 都市防災施設および土地利用計画

第1章 緒論	97
第2章 意志決定理論による地震時防災計画の定式化	99
2.1 緒言	99
2.2 決定樹木分析	99
2.3 地震時防災施設計画の定式化	101
2.3.1 地震火災を考えた決定樹木	101
2.3.2 耐震防火水槽の算定モデルの定式化	106
2.3.3 地震時火災の被害軽減対策	109
2.4 結言	109
第3章 地震時火災危険度の推定	111
3.1 緒言	111
3.2 従来の地震時火災に関する研究	111
3.2.1 木造家屋の地震時倒壊率	111
3.2.2 木造家屋の地震時出火率	112
3.2.3 地震時の焼失戸数	112
3.2.4 延焼阻止時間	113
3.2.5 地震時火災危険度	113
3.3 筆者による地震時火災危険度の予測モデル	116

3.3.1	概説	116
3.3.2	焼失面積と火災損害額	117
3.3.3	地震時火災によるリスクおよび地震時火災危険度の定義	118
3.3.4	地震時火災危険度の計算	118
3.3.5	計算結果	120
3.4	結言	121
第4章	耐震防火施設計画	123
4.1	緒言	123
4.2	防火水槽の最適配置数の算定	123
4.2.1	算定モデルの概要	123
4.2.2	地震時火災によるリスクの計算	126
4.2.3	データの概要	128
4.3	計算結果	131
4.4	結言	141
第5章	地震時火災を含む災害危険度を考慮した土地利用計画	143
5.1	緒言	143
5.2	土地利用と災害の関係	144
5.2.1	災害の種類と危険性評価	144
5.2.2	地震時火災の危険性	145
5.2.3	水害の危険性	147
5.2.4	斜面崩壊の危険性	147
5.3	土地利用計画モデル	149
5.3.1	従来の土地利用計画モデル	149
5.3.2	土地利用計画と目標計画法	150
5.4	計画の前提条件	150
5.4.1	ゾーニングと土地利用形態	150
5.4.2	環境評価項目	151
5.5	モデルの定式化	152

5.5.1 変数の定義と目標制約条件の定式化	152
5.5.2 目的関数	154
5.5.3 モデルの仮定	155
5.6 適用例と考察	155
5.7 結言	164
第6章 結論	165
結 論	167
参考文献	171
謝 辞・あとがき	177

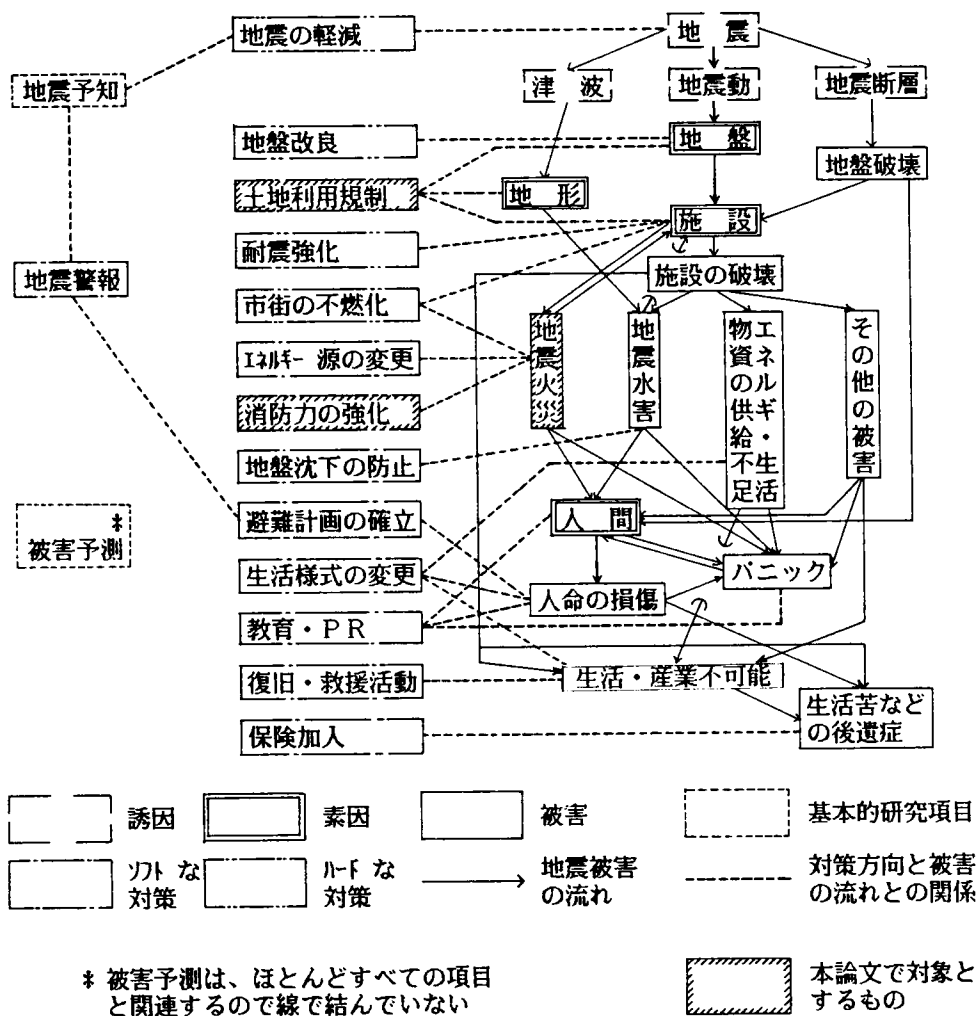
序 論

序 論

1. 研究の目的

わが国は環太平洋地震帯に属しており、過去に多くの大地震を経験してきている。また、わが国の多くの都市は沖積平野や海岸線の埋立地等に立地し、多くの木造建築物で構成されているのが現状である。このようなわが国の都市の立地条件は、大震時には地盤や建物の破壊をはじめとし、同時多発火災による市街地大火あるいは津波による浸水の被害等に対して極めて高い災害ポテンシャルを作り出している。たとえば、東京都防災会議による関東大震災と同程度（マグニチュード 7.9）の規模の地震が発生した場合の東京都区部の被害想定¹⁾の例を示せば次のようである。すなわち、冬の夕食時に地震が発生し、風速6m/秒の前提条件の下では、木造建物の全壊62,000棟、火災による焼失家屋 470,000棟、水害による流失建物11,000棟、負傷者63,000人、死者36,000人などの被害を蒙るものと推定されている。東京都に限らず、わが国の多くの都市は程度の差こそあれ、このような甚大な被害が予測されるものと考えられるが、「安全性の確保」という点を重視した防災都市づくりが、各地において必ずしも強力におし進められているとは言えないようである。これは、地震災害の対策に関して学問的に未解明な部分が多いこと、あるいは今までどちらかと言えば生産性や機能性を重視した都市環境づくりが優先的で、この「防災」の面があまり考慮されなかったことなどによるものと思われる。しかし、安全性は都市の持つべき必須条件であって、災害が発生した場合の被害を出来る限り最小限に抑えるために、防災事業を計画的に行なっていくことが必要である。

図-1は、地震災害に対する地域防災計画のための諸要素の関連が示されたものである。²⁾この図のように多くの計画が必要となることがわかるが、一般にこれらの計画は、「災害予防計画」、「災害応急対策計画」および「災害復旧計画」の3つに大きく分類される。¹⁾この論文では、「災害予防計画」の分野を扱う。「災害予防計画」は、地震の来襲による被害を可能な限り喰い止めようとするのがねらいで、地震予知、施設・家屋の耐震・耐火強化、地盤改良、土地利用規制・変更、防災教育・知識の普及および避難訓練消防力強化計画等が含まれる。これらのうち、地震学や耐震工学の発達によって、施設・構造物の耐震性はかなりの精度で確保されるように設計基準が整備されつつある。一方、先に述べたように、わが国の主要な大都市が沖積平野や海岸線の埋立地に立地しており、木造家屋



図－1 地震災害に対する地域防災計画のための諸要素の関連（田治米らによる）

が多い現状では、地震による個々の建造物の倒壊といった一次災害よりも、付随して発生する火災や津波による水害等の方がむしろ大きな被害を及ぼす。したがって、施設等の耐震設計と同時に二次災害を最小に喰い止めるための適切な土地利用と消防力の強化、消防活動計画、防災知識の普及等は極めて重要である。この論文では、耐震設計等に比較して研究の立ち遅れている「消防力の強化」および「土地利用規制」の地震対策に関して詳しく検討を行なう。

すなわち、本論文では、①市街地火災の被害を最小限に止めるための手段をさぐる基礎としての火災の延焼機構の分析を行うこと、②それを基に防火施設の整備による被害軽減に関する知見を得ること、および③土地利用の変更計画について、より合理的な計画手法を確立することを目的としている。

2. 研究の内容

「火災の現況および延焼機構の分析」と題する第1編においては、火災および防火対策の現況を概観し、出火状況や消防活動の面から問題点を考察し、火災の延焼機構の分析および防災計画を考える上での基礎的な検討を行なう。また、実家屋群の火災実験および実際の火災資料から新しく火災延焼速度式を定式化し、さらに放水量および放水開始時間が鎮圧にどのように効果を及ぼすかという解析結果を述べ、火災延焼モデルに関する研究結果について論述する。

「地震時火災危険度を考慮した都市防災施設及び土地利用計画に関する研究」と題する第2編においては、第1編で得られた研究成果に基づいて火災危険度を定義する。さらに意志決定理論による地震時防災計画の定式化を行ない、これを耐震防火水槽の整備計画に適用した例を示している。すなわち、耐震防火水槽の設置数を決定する方法に関する研究成果を示した。最後に、土地利用を変更することにより地震、水害、斜面崩壊の危険度を軽減させる方法について検討し、従来の都市の機能論的な計画手法に加えて防災的見地を含めた土地利用の計画手法について論じた。

本論文のフローチャートを図-2に示す。

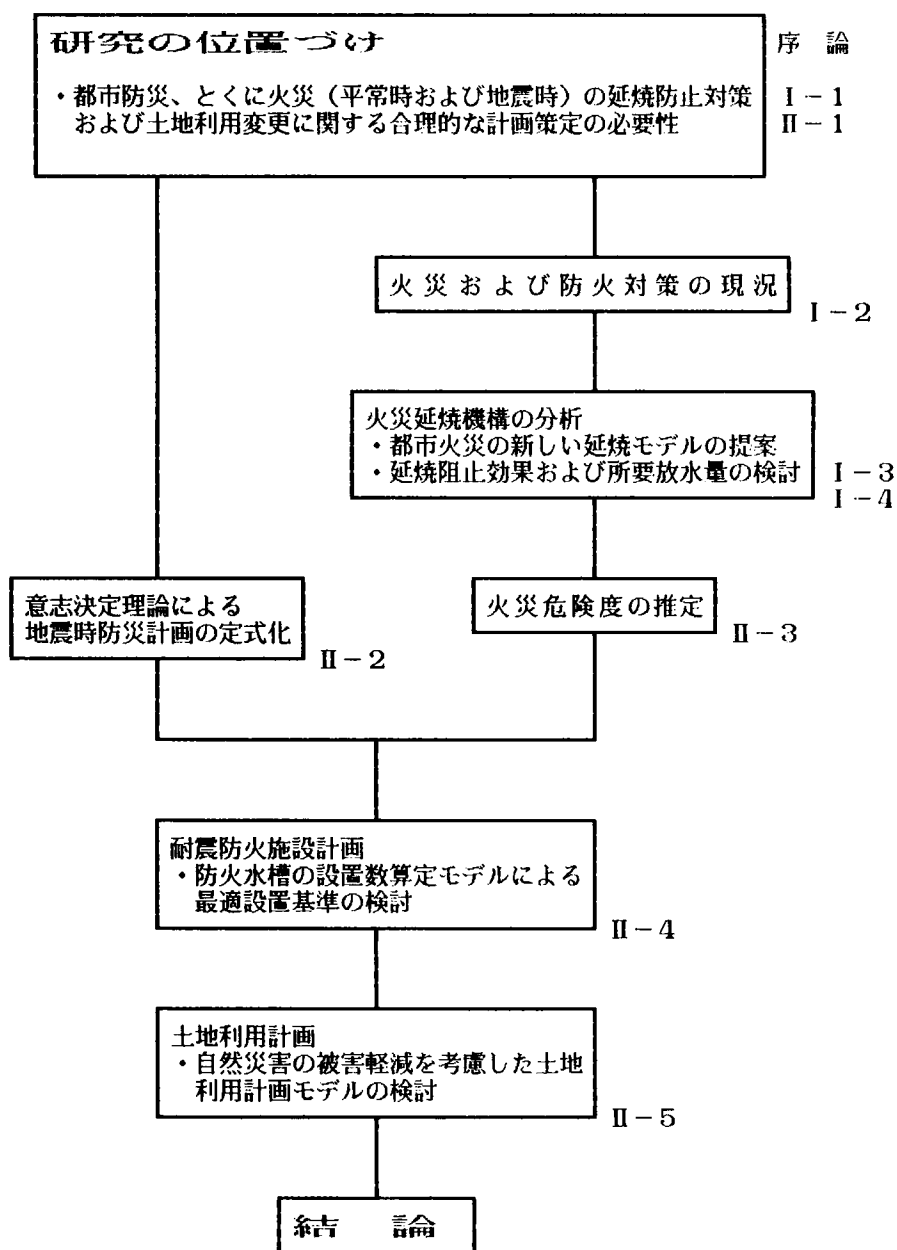


図-2 本論文の構成

第 1 編 火災の現況と火災延焼機構の分析

第 1 章 緒論

大震時には、多数の地点より出火し市街地は大火の様相を呈することが予想される。一方、平常時の火災においては、大火の発生数こそ少ないものの火災による被害は相当な額にのぼっている。今後も適切な防火対策が推進されなければ、かなりの損害が続くものと思われる。

一般に、都市の防火は、根本的には都市の不燃化によって安全が確保されるべきであろうが、現実には完全に不燃化された都市は未だ存在せず、特にわが国の都市のように、その多くが木造建築物で構成されている現状においては、どのようにすれば防火上最大の安全性がより経済的に確保されるか、その方法はどうかということが問題となろう。このような防火上の問題を解決するために、建築構造や材料を不燃化する建築的方法や、防火地域の制定などの都市計画的 방법이研究され、その一部は実現されている。一方、これら建築的あるいは都市計画的な方法に対して、一度発生した火災を消し止め、被害を最小限度に止めるという消防的方法については、あまり科学的な解明がなされていないのが現状である。そこで筆者は、この分野に科学的な検討を加え、完全不燃化の不可能な段階における消防的方法を確立することを目的とし、「火災の延焼機構の分析」を行なう。これを基礎とした具体的な防災計画への展開は第2編において取り扱い、本編では、火災の延焼機構の理論的考察および解析結果について述べる。以下に各章の内容をまとめるとつぎのようである。

第2章では、本論文の研究の位置づけとして、火災の現状および防火対策の現況について、各種の資料により把握し、その問題点について述べている。

第3章では、実家屋群の火災実験を分析し、建物火災のより合理的な新しい延焼モデルを提案している。また、実際の都市の詳しく調査された火災資料をもとに、この延焼モデルを実用化している。

第4章では、消防活動における放水量および放水開始時間の延焼阻止効果を定式化し、これをもとに消防出動計画について検討している。また、この延焼阻止モデルを都市における火災の焼失面積の予測に適用し、モデルの妥当性を検証している。

第5章では、第2章～第4章で得られた主要な成果について結論的に要約している。

第2章 火災および防火対策の現況

2.1 緒言

建物火災の一般的な拡大経過は、およそつぎのようである。たとえば、たばこの火が紙屑等に着火するといった「出火」の現象から、その炎がカーテン、壁あるいは天井等に燃え移り、建物全体へ、さらには隣棟へ延焼拡大していくというようなプロセスを経る。このような火災の発生および被害の各段階すなわち、「火源」、「着火」、「燃焼」、「延焼拡大」および「人命の損傷」とこれらの種々の対策の関連をまとめたものが、図 1-2-1 である。これは、主として平常時の火災についての対策を考えたものであるが、各項目の中で耐震性および地震時の状況を考慮するものとすれば、そのまま平常時のみならず地震時の対策を含んだものを示すと考えて差し支えないものと思われる。

さて、火災の対策は、まず火と可燃物の安全管理を行なうことである。後述するように、火災の大部分は失火、すなわち、火の取り扱い上の不注意や不始末から発生している。この失火を防ぐためには、各個人の防災意識を高めること、具体的な火気、可燃物、危険物等の取り扱い方法を周知徹底させることなどの、いわば教育や訓練が必要となろう。また、技術の進歩等によって火気器具の安全化やエネルギーの改善が期待される。このような対策によっても、なお出火が防げないとすれば、火災を感知し、初期消火を行なう必要がある。この場合は、種々の火災感知器、警報・通報機器の設置により早期発見を自動的に行なえるようにしておくことが重要である。

一方、建築的な対策としては、材料の不燃化、延焼遮断工作物の設置、耐火設計等が挙げられる。また、都市計画的な対策としては、市街の不燃化、土地利用規制、建物用途規制等による火災被害の軽減対策も有効であると考えられる。さらに、都市の完全な不燃化がなされない段階においては、消防力の強化による被害の軽減を考えることは極めて重要である。

なお、人命の安全を確保するためには、火災現場からの避難が容易に行なえるための設備・施設の設置、放送等による誘導、安全空間の確保、救急・救護活動が重要である。

ところで、図 1-2-1の種々の対策は、出火防止、延焼防止および避難の3つに大別される。理想としては、完全に出火が防止できれば、あとの2つの対策は無意味となる。しかし、現時点においては、火気器具等の安全性を100%にすることやすべての人々に対して完

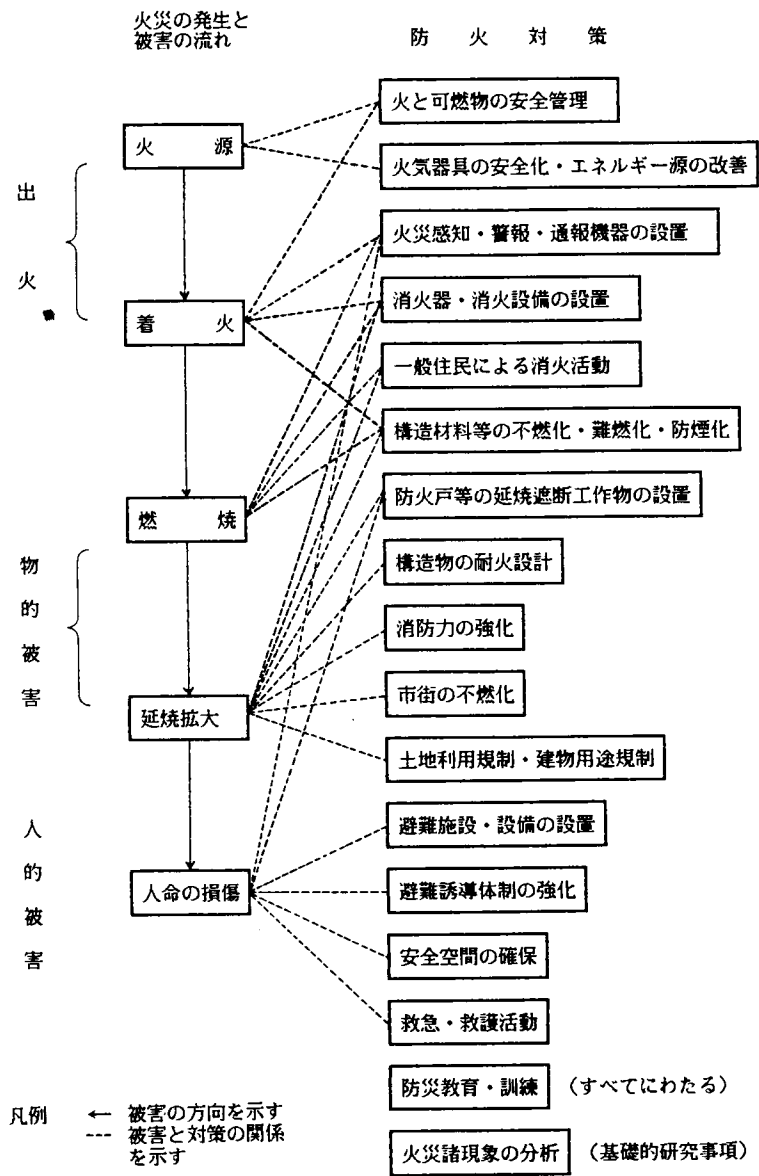


図 1-2-1 火災と防火対策の関連

注) 対策の各項目の中で耐震性や地震時の状況を考慮すれば、地震時火災対策も含んでいるものと考えられる。

全に火の管理を行なうことを期待することは、現状からみて不可能に近いと思われる。したがって、できる限り出火を防止し、できる限り延焼を防止し、できる限り人命の安全を確保するという対策を平行して進めざるを得ない。しかも、これらの対策には莫大な費用と時間を要するものが多いので、有効かつ適切に組み合わせることが重要である。しかし、対策の効果が必ずしも十分に解明されていない関係もあって、各都市において合理的に計画されているとは言い難い。

そこで、本章では火災および防火対策の現況を概観し、出火状況や消防活動の面から問題点を考察し、次章以降における火災の延焼機構の分析および防災計画を考える上での基礎的な検討を行なう。

2.2 火災の原因

2.2.1 平常時火災の出火原因

全国の建物火災は、毎年40,000件前後を数えている。最近の例として、昭和56年中の建物火災³⁾38,882件の主な火源別の原因と経過を図1-2-2に示す。これらの原因の中では、こんろ、たばこ、放火、風呂かまどが上位を占め、最近数年間はほぼ同じ傾向である。図中の経過より火の取り扱いの不注意、不始末から多くの火災が発生していることがわかる。このように、平常時火災の出火原因は、人間の不注意によるいわゆる失火が大半を占めている。われわれが、産業や生活を営むうえで火の必要性は言うまでもないが、火を使用する以上、そして火と着火物の安全管理が完全に行なわれない限り、将来も引き続き火災は発生するものと考えられる。

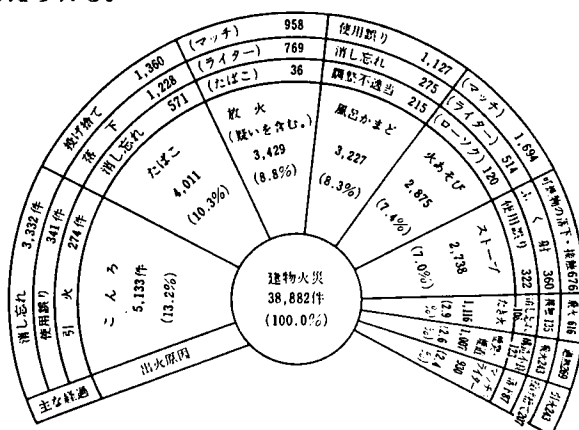


図 1-2-2 建物火災の主な出火原因と経過

従来、消防庁においては、火災予防運動などにより国民に対する防火思想の普及宣伝に努めているが、なお一層、国民の防災意識の高揚を啓発し、出火防止を計ることが必要と思われる。この場合、単なる観念的な「火の用心」を訴えるのみならず、具体的な火気の使用法、取り扱い上の注意事項を周知徹底させることが重要であると思われる。

一方、火気器具の改良やエネルギー源の改善等により、火気の利用形態をより安全なものとする技術的な努力も必要となろう。火気器具の安全性は、各種安全装置等の開発により、徐々にではあるが向上しているが、さらに一層の研究開発が望まれる。また、安価で便利等の理由で、都市ガス、LPガスが広く普及しているが、これらによる火災件数は、³⁾昭和56年中においては表 1-2-1に示すように、7691件となっており、建物火災全体の約20%を占めている。さらに、これらのガスによる爆発等の災害発生件数も表 1-2-2に示すように、³⁾ガス火災と同程度の約7500件となっており、安価で便利な燃料である反面、これらの災害を発生させる危険物としての片鱗をみせている。また、平常時よりも過酷な条件となる地震時には、これらの流出、火災、爆発等の危険性が大となると考えられ、燃料として用いる場合の安全性を見直すことも重要な課題であると思われる。

³⁾
表 1-2-1 発生場所別ガス火災件数 (昭和56年中)

発生場所 ガス種別	飲食店	旅 館	共 同 住	専 用 住 宅	工場・ 作業場	防火対 象物等	その他	計
LPガス	150	10	825	1,867	31	508	140	3,531
都市ガス	208	21	548	2,619	135	264	365	4,160
計	358	31	1,373	4,486	166	772	505	7,691

(注) 上記の火災件数は、消費先のみのものであり、製造所等の火災件数は含まない

³⁾
表 1-2-2 ガス爆発等の発生件数 (昭和56年中)

形 態 ガス種別	爆 発	中毒・ 酸欠	破 裂	その他	計
LPガス	304	412	11	1,874	2,601
都市ガス	57	1,613	10	3,236	4,916
計	361	2,025	21	5,110	7,517

(注) 上記の形態には、爆発が原因となって火災となった事例を含まない

2.2.2 地震時火災の出火原因

水野は、表 1-2-3に示される関東大震災以後の火災を伴った13個の地震について調査し⁴⁾た発火源の内訳を表 1-2-4のように示している。また、その特徴についてつぎのように述べている。

- ① 炊事用火気器具からの出火が圧倒的に多い。
- ② 暖房用火気器具からの出火は、丹後地震、1968年十勝沖地震が大半を占め、丹後地震では、こたつやいろりから、1968年十勝沖地震では、石油ストーブから出火している。
- ③ 特殊火源からの出火としては、ほとんどの地震で薬品から出火しており、一般の火気器具からの出火の約7%になっている。
- ④ 石油基地からの出火としては、新潟地震が最も大きく、大延焼しているが、1968年十勝沖地震でも出火はしなかったが危険物施設の危険性を示している。

表 1-2-3 関東大震災以後の火災を伴った主な地震一覧⁴⁾

No	地震名	発生年月日	時刻	全壊世帯数	焼失世帯数
①	関東大震災	1923. 9. 1	11:58	128,266	447,128
②	北但馬地震	1925. 5.23	11:10	1,295	2,180
③	丹後地震	1927. 3.27	18:27	12,584	3,711
④	男鹿半島地震	1939. 5. 2	14:58	479	0
⑤	鳥取地震	1943. 9.10	17:38	7,485	254
⑥	東南海地震	1944.12. 7	13:36	26,130	11
⑦	南海道地震	1946.12.21	4:19	11,591	2,598
⑧	福井地震	1948. 6.28	16:13	35,437	3,690
⑨	1952年十勝沖地震	1952. 3. 4	10:23	815	20
⑩	新潟地震	1964. 6.16	13:02	1,960	402
⑪	えびの地震	1968. 2.21	10:45	368	0
⑫	1968年十勝沖地震	1968. 5.16	9:49	670	13
⑬	1974年伊豆半島沖地震	1974. 5. 9	8:33	92	5

また、出火した建物用途は表 1-2-5に示されているように、住宅や商店からの出火が全体の76%、一般住宅と推定されるものを含めると90%も占めていることがわかる。

以上のように、地震時の火災は、住宅や商店の一般火気器具から発生する割合が高く、したがって、火災現場に居合わせる住民の火の始末等の行動が、出火の大小を左右することがわかる。この出火防止対策としては、平常時と同様に、住民への防災教育や防災訓練を行ない地震時の心構えを十分認識させることが肝要である。水野によれば、1974年伊豆半島沖地震の人間行動調査結果等をもとに、震度5～6の地震では、揺れている最中は、ほとんど火の始末をすることは不可能であり、揺れがおさまってから火の始末をすることが最も有効であることなどを指摘している。この場合、周囲の人々が「火を消せ」と声をかけることやあらかじめ役割分担を決めておくことが、出火防止にさらに効果的であるとしている。⁴⁾

一方、薬品を含む特殊火源や危険物施設からの火災もかなり発生している。とくに、これらが従来よりも高密度に集積されている大都市では、地震時火災の危険性が質的にも量的にも変化しており、潜在的な火災ポテンシャルが増大していることについては論をまたない。石油やガス類の危険物の流出、火災、爆発などが懸念されるが、これらの施設や装置類の耐震性・安全性についての今後の研究に期待するところが大きい。

4)
表 1-2-4 地震火災の出火源

出 火 源		出火件数	%
一 般 火 災 器 具	炊事用火気	439	38
	風呂釜	39	3
	暖房用火気	143	12
	その他不明だが、 一般火気と思われるもの	536	46
	計	1,154	100
特 殊 火 災 源	工場の業務用火気	30	計 件
	薬品	85	
	危険物	17	
	電気、その他	25	

(注) 不明分を除く

4)
表 1-2-5 地震火災の発生した建物の用途

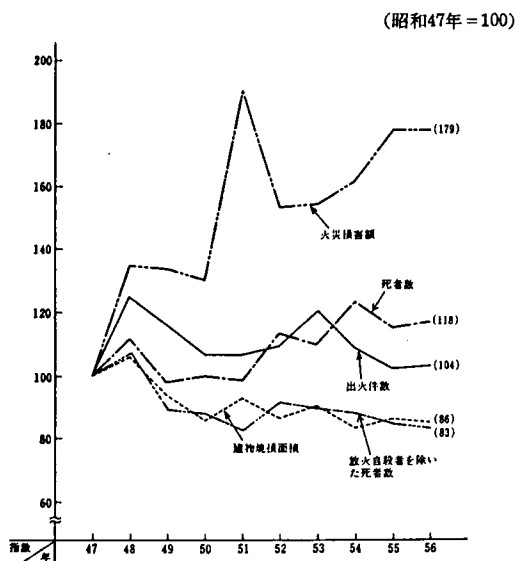
建 物 用 途	出火件数	%
住 宅	148	22
商店（一般商店）	138	20
〃 （常時火気使用施設）	226	34
公衆浴場	17	3
一般住宅と推定されるもの	95	14
工場・危険物施設等	50	7
計	674	100

(注) 不明分を除く

2.3 火災による損害

2.3.1 全国の火災概況

3)
最近の全国における火災の傾向（昭和47年～昭和56年）を図 1-2-3に示す。この図によれば、出火件数は横ばいで、建物焼損面積はやや減少の傾向にあり、死者数および火災損害額は増加の傾向にあることがわかる。また、火災損害（昭和52年～昭和56年）の一覧を3)
表 1-2-6に示す。火災の種別は、建物火災、林野火災、車両火災、船舶火災、航空機火災およびその他の火災の6種類に分類されるが、昭和56年中についてみれば、表 1-2-6より出火件数の割合は、それぞれ63.96%、6.10%、6.66%、0.27%、0.01% および23.00%となっており、建物火災の出火件数は全体の約 2/3を占めていることがわかる。一方、損害額では、建物火災は約1445億円であり、総損害額約1503億円に対して96.8% とほとんどを占めていることがわかる。このように出火件数および損害額の点よりみても建物火災の重要性が理解され、本研究が建物火災を中心に分析する理由でもある。



3)
図 1-2-3 火災の傾向 (昭和47年～昭和56年)

3)

表 1-2-6 火災損害の一覧(昭和52年～昭和56年)

区 分	年	昭和52年	昭和53年	昭和54年	昭和55年	昭和56年
出 火 件 数 (件)		63,974	70,423	63,794	59,885	60,788
建 物		39,302 (61.43)	39,912 (56.68)	38,291 (60.02)	38,014 (63.48)	38,882 (63.96)
林 野		5,227 (8.17)	7,208 (10.35)	5,534 (8.68)	4,120 (6.88)	3,709 (6.10)
車 両		3,392 (5.30)	3,590 (4.98)	3,639 (5.70)	3,773 (6.30)	4,050 (6.66)
船 舶		215 (0.336)	254 (0.361)	244 (0.382)	155 (0.259)	157 (0.258)
航 空 機		2 (0.003)	5 (0.007)	4 (0.006)	2 (0.003)	7 (0.012)
そ の 他		15,836 (27.75)	19,454 (27.62)	16,082 (25.21)	13,821 (23.08)	13,983 (23.00)
焼 損 棟 数 (棟)		51,828	53,552	51,925	51,317	53,239
建物焼損面積 (㎡)		2,124,268	2,209,124	2,043,066	2,128,326	2,100,850
林野焼損面積 (a)		555,642	773,054	395,933	530,685	196,866
死 者 (人)		1,909	1,854	2,070	1,947	1,971
負 傷 者 (人)		8,506	8,718	8,157	8,049	8,004
り災世帯数 (世帯)		39,693	39,789	37,801	37,948	38,385
り災人員 (人)		129,990	131,927	123,051	123,467	124,120
損 害 額 (百万円)		129,393	130,539	136,827	150,707	150,303
建 物		122,064	123,667	131,131	144,991	145,474
林 野		4,858	3,059	1,472	2,081	742
車 両		1,504	1,264	1,780	1,419	1,441
船 舶		437	495	610	762	1,076
航 空 機		—	868	5	0	224
そ の 他		980	1,186	1,829	1,454	1,347
出火率 (件/1万人)		5.7	6.2	5.5	5.1	5.2

注) 出火件数の各種火災の括弧内の数値は、全体に対する割合(%)を示す。

2.3.2 都道府県別の火災損害状況

3)

都道府県別の火災損害状況を表 1-2-7に示す。出火件数は、東京都7039件、大阪府5354件、愛知県4004件などと大都市が所在する都道府県に多い。都道府県単位の人口と出火件数の関係を図 1-2-4に示す。相関係数は、0.974 となっており、強い正の相関があることがわかる。これは、前述したように、出火原因は人間の過失によるものが多く、ある地域の人口が増加すれば、地域全体として火気の使用頻度が高くなり、したがって出火件数も多くなるものと考えられる。

つぎに、人口と建物焼損面積の関係を図 1-2-5に示す。相関係数は、0.821 となっており、かなり強い相関がある。また、人口と火災損害額との関係は、図 1-2-6に示すように、相関係数は0.959 と高い値を示している。このように、人口の多い地域は火災の頻度および被害が大きくなっており、とくに都市域への火災対策の重要性が指摘される。

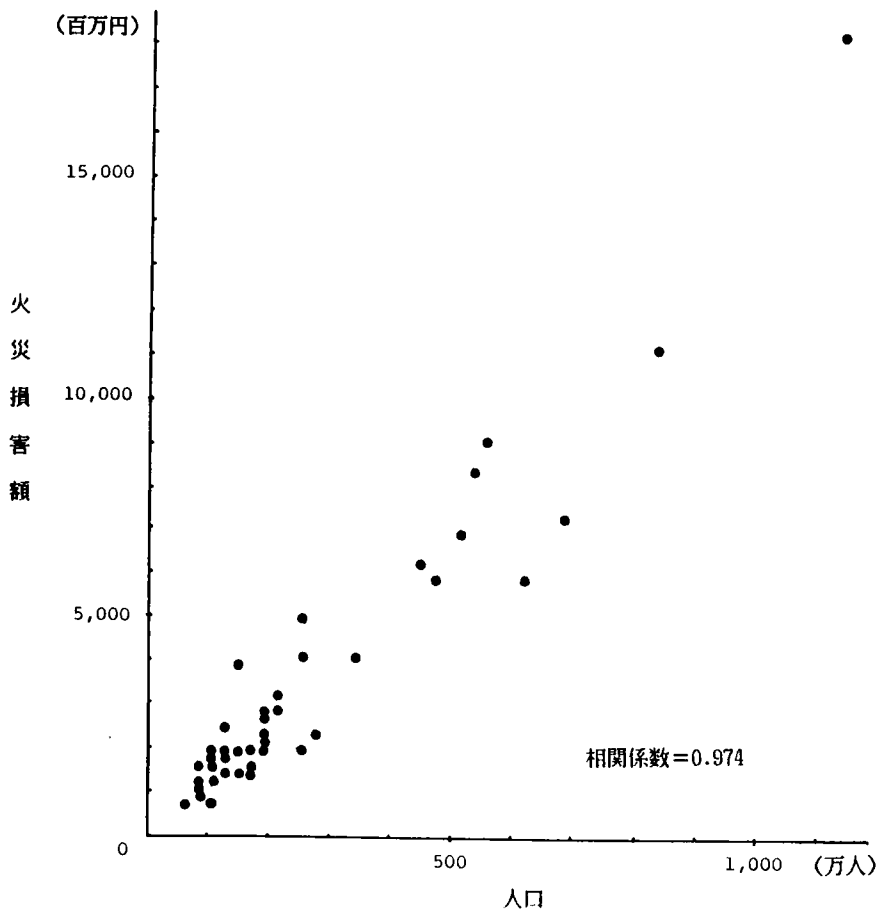
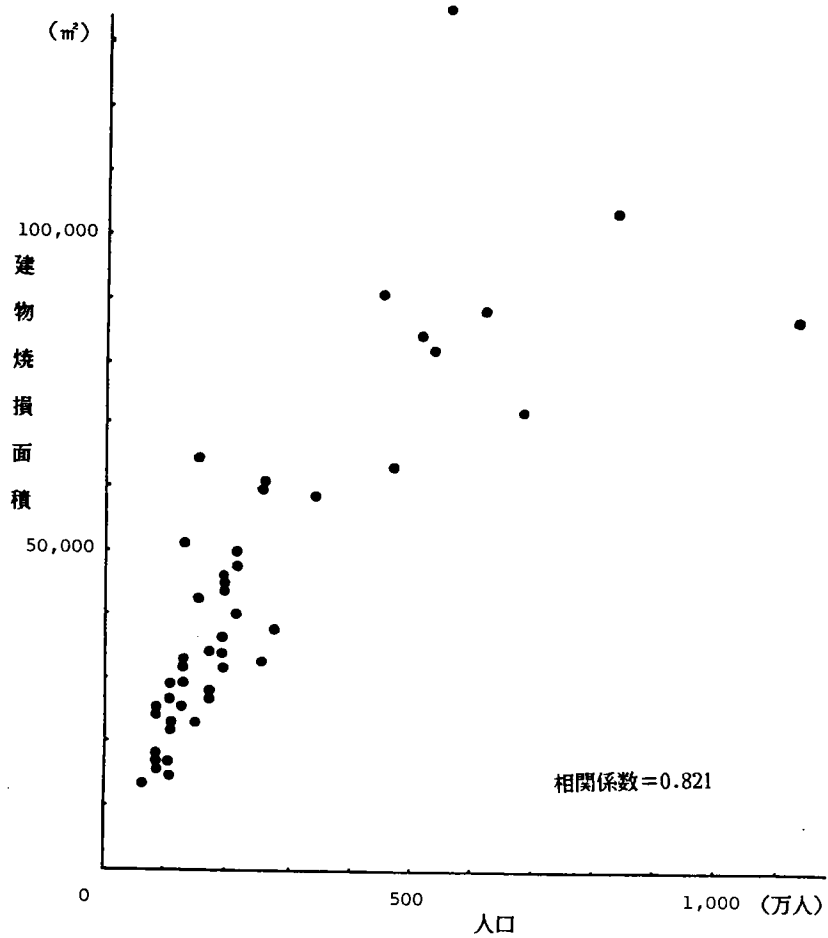


図 1-2-4 出火件数と人口の関係（都道府県単位：昭和56年中）

表 1-2-7 都道府県別火災損害状況³⁾ (昭和56年中)

区 分 都道府県	出 火 件 数		焼 損	建 物	建 物	人 口 (千人)
	全出火 (件)	建 物 (件)	棟 数 (棟)	焼 損 面 積 (㎡)	損 害 額 (十万円)	
北海道	2,326	1,923	2,197	135,641	83,345	5,589
青森	802	662	877	64,821	36,800	1,552
岩手	543	420	630	42,894	17,107	1,442
宮城	1,040	703	1,007	48,234	29,415	2,075
秋田	579	455	646	51,000	23,314	1,274
山形	543	436	517	29,004	16,240	1,258
福島	957	675	912	50,782	26,091	2,044
茨城	1,621	852	1,212	59,632	45,630	2,594
栃木	1,127	666	968	43,534	21,093	1,809
群馬	965	684	956	45,084	25,359	1,865
埼玉	2,408	1,619	2,255	81,967	77,515	5,429
千葉	2,792	1,443	2,188	64,066	53,577	4,773
東京都	7,309	4,245	6,227	87,375	171,917	11,360
奈良	3,300	1,938	2,715	72,537	63,351	6,927
新潟	986	789	1,100	61,330	37,818	2,457
富山	350	308	401	26,720	11,458	1,109
石川	447	312	480	29,794	17,181	1,121
福井	321	262	373	24,344	13,790	798
山梨	422	266	351	17,175	7,653	813
長野	782	597	751	40,925	25,584	2,092
岐阜	1,119	645	847	46,227	26,541	1,968
静岡	2,011	1,116	1,563	58,232	36,161	3,475
愛知	4,004	2,109	2,746	88,091	54,809	6,200
三重	970	451	622	27,871	17,870	1,702
滋賀	442	279	363	16,936	14,157	1,087
京都	546	435	736	32,828	18,743	2,510
大阪	5,354	3,811	4,668	103,366	103,879	8,298
兵庫	2,995	1,850	2,420	84,048	64,066	5,121
奈良	251	208	307	33,435	22,379	1,217
和歌山	311	228	361	22,012	18,382	1,100
鳥取	322	224	340	13,644	6,502	609
島根	468	277	402	18,212	9,253	790
岡山	1,028	684	918	36,240	18,166	1,889
広島	1,564	946	1,244	38,071	21,107	2,742
山口	823	535	722	27,003	12,492	1,583
徳島	474	318	447	24,081	11,959	837
香川	667	404	545	23,538	18,736	1,006
愛媛	598	436	549	23,112	12,504	1,528
高知	463	330	553	26,132	13,551	844
福岡	1,971	1,447	2,044	90,329	56,174	4,526
佐賀	343	244	320	16,346	9,057	876
長崎	670	426	636	34,757	13,373	1,596
熊本	591	461	648	32,298	18,819	1,796
大分	589	429	587	32,455	18,454	1,238
宮崎	633	409	609	25,561	12,343	1,160
鹿児島	1,088	616	924	34,477	14,420	1,799
沖縄	873	309	355	14,689	6,607	1,129
全 国	60,788	38,882	53,239	2,100,850	1,454,739	117,009

(注) 建物損害額には、収容物の損害を含む。



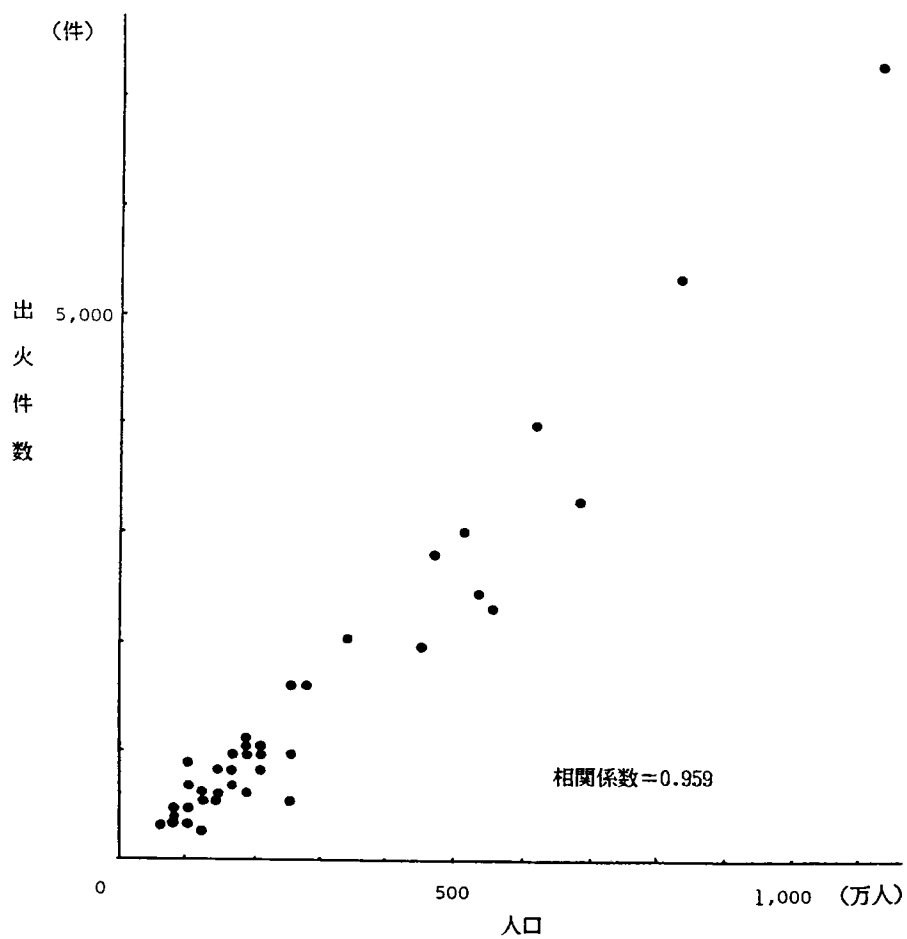


図 1-2-6 火災損害額と人口の関係（都道府県単位：昭和56年中）

2.3.3 出火率

3)
出火率は「人口1万人当たりの出火件数」をいい、各地の出火の傾向を比較する場合にその指標の1つとして用いられている。都道府県別の出火率は図1-2-4の各点と原点を結ぶ直線の傾きの1万倍の値を示す。全国の出火率はこれらの平均値であり、約5.2となっている。なお、諸外国の火災状況を表1-2-8に示す。出火率は、アメリカ131.3、イギリス63.1などとわが国に比較して桁違いに大きな値を示している。このことは、わが国の市民が一般に「火の用心」のよい国民性であると解釈することもできるが、各国の統計にも差があるので数値に示されているほど異なるのではなく、これらの国の出火率は、わが国のそれと比べてせいぜい数倍程度大きいものとされている。一方、表1-2-8よりわが国の火災1件当たりの死者数は、0.0325人/1件となっており、他の国と比較して多く、また1件当たりの損害額も251.6万円/1件と大きいことがわかる。これは、一度出火すれば燃え易く拡大しやすい木造建物が多く存在しているわが国の住宅事情等を反映しているが、それだけに十分な防火対策を行なう重要性が認識される。

3)
表 1-2-8 諸外国の火災状況 (1980年中)

区 分 国 名	出火件数 (件)	出火率	死者数 (人)	損害額 (億円)	1件当 り損害額 (千円)	1件当 り死者数 (人)
日 本	59,885	5.1	1,947	1,507	2,516	0.0325
アメリカ	2,988,000	131.3	6,505	14,175	474	0.0022
イギリス	352,600	63.1	1,035	2,473	701	0.0029
フランス	123,861	23.1	319	—	—	0.0026
西ドイツ	133,359	21.7	—	—	—	—
カナダ	85,530	35.7	833	1,898	2,219	0.0097
ニュージーランド	28,129	90.7	34	—	—	0.0012
オーストリア	22,442	29.9	91	369	1,644	0.0041
韓 国	5,711	1.5	283	40	700	0.0495

(注) オーストリアおよび韓国については1979年の統計。損害額の日本円換算については、日銀調べ。出火率は、人口一万人当たりの出火件数。

2.3.4 火災延焼に関する考察

5)
前節までは、全国の火災発生状況についてみてきたが、ここでは、火災の延焼に関して大阪府の火災資料を分析し、火災の対策への知見を得ることを目的とする。実際の火災は、単なる燃焼現象ではなく、消火行為という抵抗を受けている燃焼である。また、実験とは異なり同一条件のもとでの資料はほとんどなく、かつそれほど詳しく調査されていないので、これらの資料では細かな延焼機構の分析には不十分であるが、延焼拡大した場合の種

々の状態を把握し、火災による損害の軽減に役立たせる資料とすることができるものと思われる。さて、分析した火災資料は、昭和51年から昭和53年までに大阪府下で発生した建物火災2888件である。表 1-2-9は、延焼に影響すると考えられる項目と延焼指標のクロス分析表である。延焼に影響すると考えられる項目とは、つぎの7つである。すなわち、

表 1-2-9 延焼項目と延焼指標の関係

(a)

項目		①地 域 別		②季 節 別		③時 刻 別		④建物用途別	
延焼指標		大阪市	市 外	夏 期	冬 期	昼 間	夜 間	住 宅	産業用
出 火 件 数	焼失面積50㎡未満	473	913	556	830	901	485	642	499
	〃 50～150 ㎡	314	588	362	818	534	368	463	243
	〃 150～300 ㎡	124	223	134	213	202	145	159	113
	〃 300㎡以上	81	172	91	162	109	144	61	149
合 計	件 数	992	1,896	1,143	1,745	1,746	1,142	1,325	1,004
	(%)	34.4	65.6	39.5	60.5	60.5	39.5	45.9	34.8
平均焼失面積 (㎡)		115	128	122	125	105	153	93.2	173
平 均 延 焼 棟 数		2.2	1.7	1.8	1.9	1.8	1.9	1.8	1.9
平均覚知時間 [*] (分)		6.7	6.4	6.6	6.4	6.0	7.1	6.4	6.7

(b)

項目		⑤建物構造別		⑥放水までの時間 (分)			⑦火元延床面積 (㎡)			合
延焼指標		木 造	耐火造	10 未満	10 ～20	20 以上	100 未満	100 ～200	200 以上	計
出 火 件 数	焼失面積	602	171	585	677	124	756	234	396	1,386
	の同上の	428	108	351	475	76	320	301	281	902
	区分	177	39	114	202	31	35	112	200	347
		128	54	66	153	34	16	22	215	253
合 計	件数	1,335	372	1,116	1,507	265	1,127	669	1,092	2,888
	(%)	46.2	12.9	38.6	52.2	9.2	39.0	23.2	37.8	100.0
平均焼失面積		131	170	96.1	134	181	51.3	103	211	124
平均延焼棟数		2.1	1.5	1.7	1.9	1.9	1.9	2.0	1.7	1.8
平均覚知時間 [*]		6.7	5.9	3.4	6.6	18.3	6.4	6.3	6.6	6.5

* 参考までに示した。

地域別（大阪市と大阪市以外）、季節別（夏期〔6月～11月〕と冬期〔12月～5月〕）、時間別（昼間〔7時～19時〕と夜間〔19時～7時〕）、建物用途別（住宅と産業用）、建物構造別（木造と耐火造）、放水までの時間別（10分未満、10分～20分未満、20分以上の3段階）および火元延床面積別（100㎡未満、100～200㎡未満、200㎡以上の3段階）である。延焼指標としては焼失面積^{*}別の出火件数、平均焼失面積および平均延焼棟数の3つである。表 1-2-9より、つぎのことが指摘される。

① 地域別には、中心部の大阪市よりも市外部の方が出火件数は、1,896件（65.6%）と多く、また平均焼失面積は 128㎡であり、大阪市（115㎡）と比較して若干大きい。しかし、延焼棟数は大阪市の方が 2.2と多い。この理由としては、大阪市の建物規模（とくに住宅の規模）が小さく、また消火活動が比較的速やかに行なわれるために焼失面積が小さくなるが、建物が密集しているために隣棟に延焼拡大しやすいものと考えられる。言い換えれば、市外の地域では、建物規模は比較的大きく、また消防署所の守備範囲も若干広いため放水が遅れて、焼失面積が大きくなるが、建物はあまり密集しておらず隣棟への延焼危険が小さいものと思われる。

② 季節別では、出火件数は、冬期（12月～5月）の方が 1,745件（60.5%）と夏期よりも多い。冬期の平均焼失面積は 125㎡であり、夏期の 122㎡よりもわずかに大きい。季節の条件、たとえば風速、温度、湿度などが焼失面積にあまり影響していないようであるが、「燃え」の条件よりも「消し」の条件の影響、すなわち季節にかかわらず比較的安定した消防活動を行なっているためとも考えられる。

③ 時間別では、昼間（7～19時）の出火件数は 1,746件（60.5%）であり、夜間（1142件）と比べて多いが、平均焼失面積は逆に夜間（19～7時）の方が 153㎡と昼間の 105㎡と比較して大きな値を示している。これは、夜間には火災の覚知が遅れ、したがって、放水も遅れるために焼失面積が大となるのである。夜間の消防体制の整備が必要であることが指摘される。

④ 建物用途別では、産業用建物の平均焼失面積は 173㎡となっており、住宅の93.2㎡よりもかなり大きい値となっている。火元延床面積別の延焼傾向については⑦で述べるが、産業用建物の火元延床面積は一般に大きく、したがって延焼しやすいためである。

* 「焼失面積」と「焼損面積」と2通りの用語があり、両者とも同様の意味を表わす。後者は、消防白書等の火災資料によく用いられ、この方が適切な表現である場合もあるが、以下では慣用されている前者を用いることにした。

⑤ 建物構造別では、耐火造の出火件数は 372件（12.9%）と木造の1335件に比べて少ないが、平均焼失面積は 170㎡と大きい。延焼棟数は、木造の場合の方が 2.1と多い。これは、木造と耐火造の「燃え」の性質をよく表わしている。すなわち、木造の規模（床面積）は小さく、したがって、火災規模も小さいが、隣棟に類焼しやすい。一方、耐火造は、建物規模は大きく、火災の規模も大きいが隣棟に類焼しにくい。

⑥ 放水までの時間別では、20分を越えると平均焼失面積は 181㎡とかなり大きくなっている。逆に、放水までの時間が10分未満の場合では平均焼失面積は96.1㎡と小さくなっている。消火の効果を上げるには、放水開始をできる限り早くすべきであることがわかる。

⑦ 火元延床面積別では、200㎡以上の場合には、平均焼失面積は 211㎡と大きな火災になっている。逆に、100㎡未満の場合では平均焼失面積は51.3㎡と小さくなっている。一般に、火元延床面積が大きければ、焼失面積も大となる傾向を示す。大規模な建物に対しては、耐火壁や防火戸等による延焼を遮断する工作物を設置し、延焼を抑えるなどの対策が考えられる。

以上の結果をまとめて、主に防火対策に関する問題点を列記するとつぎのようである。

① 夜間は昼間に比較すると、出火件数は少ないものの、一度出火すれば平均よりも大きな火災につながる。したがって、出火を抑える対策、火災感知器の整備等による火災の早期発見、初期消火対策に関する夜間の消防体制などについて検討する必要がある。

② 反対に昼間は、平均焼失面積は小さいが、出火件数が多いので、消火のための水利施設として消火栓に多く依っている現状において、上水道の使用量のピーク時と重なる場合等には水压低下のため消火困難となるような事態も考えられる。さらに、地震時には、上水道は各所で寸断され、消火栓は使用できなくなる恐れがある。したがって、消火栓以外の消防の水利施設、たとえば防火水槽や井戸などを整備することを検討する必要があることが指摘される。

③ 一方、恒久的な対策としては、上水道のバイブラインの耐震性を向上させて、消火用水および生活用水を確保する対策も必要であると思われる。しかし、これを達成するには、莫大な費用と時間を必要とし、また、バイブラインの信頼性を100 %にすることは難かしく、②の対策と平行して進めていくべきものと考えられる。

④ 「燃え」の条件として、火元延面積が大きければ延焼拡大しやすい傾向があることがわかったので、防火区画の設計等の工夫を要することが指摘される。

⑤ 「消し」の条件として、とくに放水の遅速が影響し、分析した例では、放水開始が10

分未満の場合では、焼失面積は96.1㎡と小さな値となっている。

以上のようなが、この節で取り扱った火災資料からは、かなりマクロ的な火災の実態しか把握できなかった。さらに詳しい調査資料による分析は次章以降で行なう。

2.4 防火対策の現況

前節では、火災の現況を概観し、その対策の必要性について述べたが、この節では、現実にはどの程度の対策がなされているかについての実態を各種の調査から把握し、問題点を考察する。

防火対策は、施設・設備面を整備する、いわゆるハードの対策と火の管理、避難、住民の防災意識の向上といった人間の行動・運用面に関するソフトの対策に分けられる。以下では、ソフトとハードの対策に分類して述べる。

2.4.1 ソフトの対策

(1) 住民の防災意識

住民の防災意識を向上させることは、火災をはじめ、地震、豪雨等の被害を軽減させるための有効な手段となるものと考えられる。そこで、住民の防災意識の実態を把握し、検討を行なうことが重要である。ここでは、筆者らが広島市においてアンケート調査を行なった結果の要約について延べる。ただし、広島市に固有の項目は省き、他の都市においても一般的な傾向を示すであろう項目についてのみ示している。

① 震災や火災の危険・不安意識はかなり高く、震災に関しては約7割、火災に関しては8割以上もの世帯が平常時より不安を感じている。しかし、家庭内での災害についての話し合いをしたことのある家庭は、半数の5割である。また、住民に最も身近な組織である自治会での災害についての話し合いは殆んどなく約1割の世帯が有ると答えているのみである。さらに、具体的な自衛手段としての非常時の準備状況は、消火器を備えている世帯が約6割、また、非常袋は1.5割の世帯が備えているにすぎない。

災害に関心があるにもかかわらず、実際にそれに対して備える様子がないことについては、経済的な問題等の理由が考えられるが、この点については詳しい調査を行ない心理的側面から検討する必要がある。

② 地震時直後を想定した場合の危険・不安意識では、家族の安否については約9割の住民が不安を抱いている。地震時の自宅からの火災発生に対する不安は約6割と高く、さ

らに、延焼に対する不安が 7.5割とかなりの住民が火災に関して不安を抱いているといえる。自宅の倒壊の不安意識も約6割と高くなっている。このように住民の大半がなんらかの不安を抱いており、これらの不安意識を低減させる対策を考える必要がある。

③ 地震発生後しばらくしてからを想定した場合の不安意識では、最も不安意識が高いのは電気・ガス・水道が止まることであり、約8割の住民が不安に思っている。住民にとって最も身近な問題であるので関心が高い。また、消火・消防活動、役所の適切な処置、救急・救助活動の応急対策に関する項目に、6割近くの住民が不安を訴えている。また、正確な情報の伝達の不安、デマ・パニックの不安の混乱状態に関する不安も、6割前後の値となっている。このように、住民はこれらの項目に対してもかなり高い不安意識を抱いており、地震時直後と同様に防災計画を考えるうえで考慮すべき点が多々あると考えられる。

④ 大部分の自治会では防災委員会、防火委員会、防犯委員会などを組織しているが、あまり活発とは言えないようである。また、消防訓練などに参加する住民は少ない。しかし、最近、近くで火災があったなどの理由で関心が高まっている地区もある。また、防災委員会を中心に住民も協力して防災について考えていこうとする姿勢を持つ地区もある。最後に、防災に関する行政側の資料提供については、1回きりの資料配付でなく数多く住民に呼びかけてPRしてほしいという意見が多く見受けられ、教育・啓蒙に関する検討を要する。

(2) 住民による初期消火

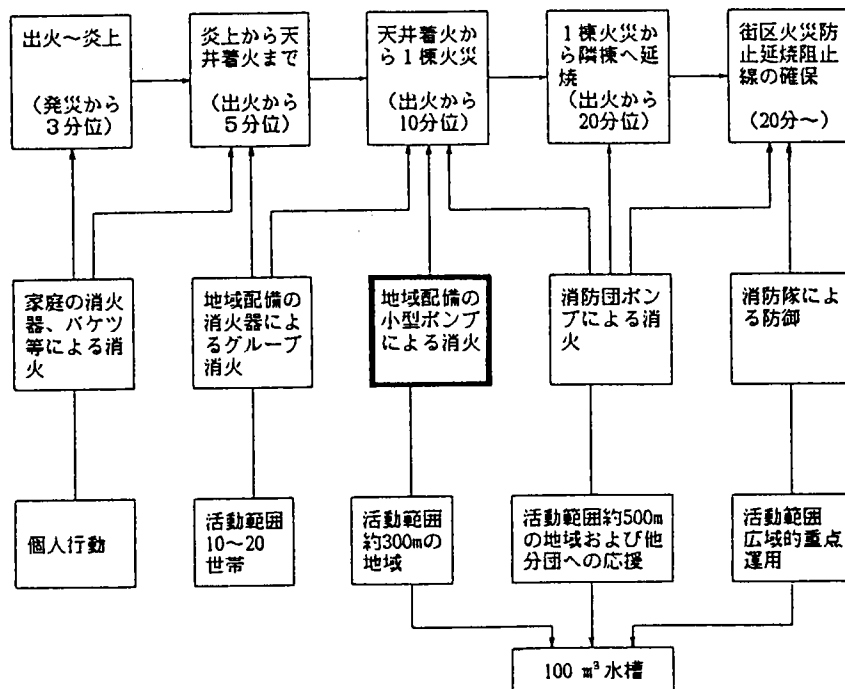
水野によれば、平常時の火災における住民による初期消火率は、大都市では55～60%程度である。一方、表 1-2-3の地震時火災における初期消火率は、炊事用火気器具からの出火の場合は約47%であったとしている。⁴⁾

なお、初期消火を不特定の個人に期待することをせずに、住民による地域ぐるみの防災体制を整備するために、自主防災組織が育成されている。この自主防災組織の結成状況を表 1-2-10 に示す。東海地方の地震防災対策強化地域に含まれる静岡県92.6%、山梨県85.2%、神奈川県70.6%などは組織率は高いが、全国的には相当の差があることがわかる。この自主防災組織の強化によって、初期消火率を上げることができるものと思われるが、過大な期待を寄せることはできない。東京都では、自主防災組織の役割を図 1-2-7のように明確に規定している。⁹⁾

表 1-2-10 自主防災組織の結成状況³⁾ (昭和57年4月現在)

区 分	市区町 村 数	自主防 災組織 を有す る市区 町村数	自 主 防 災 組 織 数	組織されて いる地域の 世帯数	組織率 (%)
都道府県					
北海道	212	45	700	125,104	6.6
青森県	67	14	49	7,613	1.7
岩手県	62	32	114	67,461	16.7
宮城県	74	44	1,105	233,845	38.8
秋田県	69	39	989	67,817	20.0
山形県	44	41	512	45,346	13.8
福島県	90	10	130	20,245	3.6
茨城県	92	23	328	39,586	5.5
栃木県	49	19	101	17,014	3.4
群馬県	70	38	297	130,011	24.8
埼玉県	92	40	749	365,399	22.2
千葉県	80	29	487	160,599	10.9
東京都	64	43	4,084	2,881,591	65.5
神奈川県	37	33	5,119	1,657,102	70.6
新潟県	112	25	201	15,511	2.4
富山県	35	18	240	36,216	12.3
石川県	41	34	775	71,617	22.2
福井県	35	24	923	65,928	31.0
山梨県	64	64	2,243	197,934	85.2
長野県	122	47	1,309	151,266	25.5
岐阜県	100	65	2,080	281,705	52.5
静岡県	75	75	4,519	918,836	92.6
愛知県	88	44	2,118	1,060,605	56.2
三重県	69	34	495	70,342	14.3
滋賀県	50	32	1,047	95,219	31.6
京都府	44	18	391	71,261	8.2
大阪府	44	8	411	99,459	3.6
兵庫県	91	24	539	127,875	7.8
奈良県	47	15	253	61,885	17.2
和歌山県	50	14	132	12,399	3.7
鳥取県	39	37	904	57,382	32.7
島根県	59	17	349	17,103	7.4
岡山県	78	25	989	113,448	19.5
広島県	87	17	462	244,410	26.9
山口県	56	18	174	21,119	4.1
徳島県	50	12	117	10,373	4.2
香川県	43	19	139	16,871	5.5
愛媛県	70	11	82	69,187	14.1
高知県	53	13	329	18,668	6.5
福岡県	97	18	330	376,041	25.7
佐賀県	49	4	93	11,142	4.7
長崎県	79	13	91	10,265	2.1
熊本県	98	29	100	43,347	8.1
大分県	58	10	24	5,998	1.6
宮崎県	44	8	43	5,626	1.5
鹿児島県	96	17	168	17,978	2.9
沖縄県	53	5	64	12,266	3.9
全 国	3,278	1,264	36,898	10,208,015	27.7

(注) 組織率は、組織されている地域の世帯数を管内の世帯数で除したものである。



9)
図 1-2-7 自主防災組織の役割 (太い枠をした部分)

2.4.2 ハードの対策

(1) 初期消火用設備・機器

a. 消防用設備の設置状況

全国における特定防火対象物の屋内消火栓およびスプリンクラー設備の設置状況を表 1-2-11 に示す。屋内消火栓の設置率が90.1%、スプリンクラー設備の設置率は94.4%と高い率である。しかしながら、法律で設置が義務づけられているにもかかわらず、設置率が100 %に達しないのはいかなる理由であろうか。防火対象物の責任者の早急の対応および消防機関の積極的な指導・監督が望まれる。

表 1-2-11 全国における特定防火対象物の屋内消火栓およびスプリンクラーの設置状況³⁾
(昭和57年3月現在)

特定防火対象物	消防用設備 事項	屋 内 消 火 栓				ス プ リ ン ク ラ ー			
		設 置 必要数	設置数	違反数	設置率 (%)	設 置 必要数	設置数	違反数	設置率 (%)
劇 場 等		1,445	1,261	184	87.3	224	205	19	91.5
公 会 堂 等		3,663	3,299	364	90.1	253	247	6	97.6
キャバレー等		174	143	31	82.2	18	15	3	83.3
遊技場等		869	805	64	92.6	331	314	17	94.9
料理店等		775	548	227	70.7	3	3	—	100.0
飲食店等		1,133	956	177	84.4	35	33	2	94.3
百貨店等		8,927	7,591	1,336	85.0	2,139	2,073	66	96.9
旅館等		12,685	11,080	1,605	87.3	612	526	86	85.9
病院等		8,118	7,773	345	95.8	1,124	1,044	80	92.9
社会福祉施設		2,653	2,472	181	93.2	34	33	1	97.1
幼稚園等		1,628	1,433	195	88.0	14	14	—	100.0
特殊浴場		57	52	5	91.2	1	—	1	0
特定複合用途防火対象物		11,985	11,330	655	94.5	2,838	2,688	150	94.7
地下街		60	59	1	98.3	53	52	1	98.1
準地下街		—	—	—	—	4	4	—	100.0
計		54,172	48,802	5,370	90.1	7,683	7,251	432	94.4

(注) 違反数は、法令に違反し、屋内消火栓またはスプリンクラー設備が設置されていない防火対象物数である。

b. 一般家庭における消火器

一般家庭における消火器の普及率を表 1-2-12

に示す。調査地域、調査年および、調査方法はそれぞれ異なるが、東京都約40%、京都市約70%お^{8),9),10)}よび広島市約60%となっている。消火器の一般家庭における設置は義務づけられているわけではないので、普及率はそれほど高くないが、自衛手段

の1つとして整備すべきであろう。普及率を上げるには、住民の防災意識の向上などのソフトの対策が考えられる。

表 1-2-12 消火器の普及率^{8),9),10)}

都 市	普及率	調査年
東京都	約 40 %	昭和47年
京都市	約 70 %	昭和50年
広島市	約 60 %	昭和54年～56年

(2) 消防力の現況

消防活動は、「消防機械」、「消火剤としての水(消防水利)」および「人」により遂行される。これらが一体となって、はじめてその効果を発揮するものであり、これらの要素を「消防力」という。¹¹⁾全国の消防機械の保有数は表1-2-13のようである。¹²⁾これは昭和46年以降の推移を示したもので、毎年徐々にではあるが充実していることがわかる。

12)

表 1-2-3 全国の消防器械保有数の推移

年 月		46.4.1	47.4.1	48.4.1	49.4.1	50.4.1	51.4.1	52.4.1	53.4.1	54.4.1	55.4.1	(B)-(A)
区 分		(A)									(B)	(A)
消防本部・消防署	消防 消防自動車	3,318	3,587	3,887	4,191	4,211	4,295	4,363	4,363	4,415	4,499	0.355
	水槽付消防 消防自動車	1,418	1,520	1,740	1,924	1,993	2,087	2,188	2,238	2,373	2,528	0.782
	小型動力消防	946	942	1,136	1,434	1,681	2,243	2,383	2,360	2,013	2,304	1.435
	はしご付消防自動車	401	442	510	618	697	757	795	819	498	539	0.344
	化学消防自動車	458	501	569	630	665	695	733	763	812	853	0.862
	救急自動車	1,433	1,750	2,148	2,601	2,861	3,132	3,337	3,390	3,592	3,805	1.655
	無線指導車	523	627	775	901	926	1,004	1,085	1,060	1,150	1,455	1.782
	その他の消防自動車	1,023	1,063	1,233	1,362	1,280	1,333	1,456	1,526	1,518	1,952	0.908
	消防艇	39	39	40	41	41	44	45	44	43	50	0.282
消防機関・含む	消防 消防自動車	13,610	13,306	13,631	13,826	13,166	13,393	13,389	12,691	12,921	13,716	0.007
	水槽付消防 消防自動車	400	399	467	460	494	525	541	542	541	577	0.442
	手引動力消防	3,333	2,151	1,755	1,363	972	854	810	901	828	1,321	0.595
	小型動力消防	57,797	55,677	56,391	56,747	51,591	52,251	51,708	47,495	47,830	49,051	0.025
	その他の消防自動車	8,119	9,296	10,501	11,899	12,791	13,756	14,784	14,711	16,285	17,402	0.068
合 計	消防 消防自動車	16,928	16,893	17,518	18,017	17,377	17,688	17,752	17,054	17,336	18,215	0.050
	水槽付消防 消防自動車	1,818	1,919	2,207	2,384	2,487	2,611	2,729	2,780	2,914	3,105	0.065
	三輪消防 消防自動車	276	125	83	43	14	9	9	7	3	-	-
	手引動力消防	3,339	2,155	1,777	1,377	975	855	815	903	890	1,409	0.583
	小型動力消防	58,743	56,619	57,527	58,181	53,272	54,491	54,091	49,855	49,843	51,355	0.030

(注) 昭和51年以前の数字には稼働不能なものが含まれている。

消防水利の種類には消火栓、防火水槽、プール等の人工水利と河川、池、湖、沼、海等の自然水利がある。自然水利は、消防水利として人工水利と並んで重要な役割を果たしているが、季節により使用不能となったり、取水場所が制限されることがあるので、消防水利の配置は、自然水利と人工水利の適正な組み合わせを考えることが必要である。全国の昭和55年における消防水利の保有数については表1-2-14に示す。人工水利の全体に対する割合は約94%、消火栓の割合は約70%となっている。

3)

つぎに、消防署所、消防 消防自動車および消防水利の充足率を表1-2-15に示す。基準値は、消防力の基準(昭和51年7月5日消防庁告示第6号改正)および消防水利の基準(昭和50年7月8日消防庁告示第10号改正)によった。ただし、簡略のため同告示に指定されている基準のうち消防署所数は、人口30万人当たり9~13(東京都および大阪府では9)、消防ポンプ自動車数は、人口30万人当たり26~46(東京都および大阪府では26)とした。また、消防水利は100 m×100 mの面積に1基と考え各地域の可住地面積に設置するものを基準値としている。表1-2-15には全国、東京都、大阪府について示した。全国の消防水利の基準値が極端に大きいのは、ここで計算に用いた可住地面積に問題があると思われるが、一応の目安を示したものである。表1-2-15により、消防力はその数量からみ

13)

表 1-2-14 全国の消防水利の現況 (昭和55年 4月 1日現在)

区 分		個 数 (構成率)
消防水利の総数		1,150,329 (100%)
人工水利数		1,086,588 (94.4)
消火栓		790,453 (68.7)
防火水槽	20～40㎡未満	95,216 (8.2)
	40㎡以上	161,070 (14.0)
井戸	20～40㎡未満	11,143 (0.9)
	40㎡以上	10,315 (0.8)
その他の水利		82,132 (7.1)

3),13)

表 1-2-15 消防署所、消防ポンプ自動車および消防水利の充足率

区 分		全 国	東京都	大阪府
消防署所	現 状 ①	4,308	286	221
	基準値 ②	3,486 ～ 5,035	341	248
	充足率 (①/②)	1.24 ～ 0.86	0.84	0.89
消防ポンプ自動車	現 状 ①	21,315	847	564
	基準値 ②	10,071～ 17,817	984	716
	充足率 (①/②)	2.12 ～ 1.20	0.86	0.79
消防水利	現 状 ①	1,068,197	104,368	88,442
	基準値 ②	12,341,700	135,700	1282,00
	充足率 (①/②)	0.087	0.77	0.69

(注) 基準値は、消防力の基準(昭和51年7月5日消防庁告示第6号改正)および消防水利の基準(昭和50年7月8日消防庁告示第10号改正)によった。ただし、簡略のため同告示に指定されている基準のうち消防署所数は、人口30万人当たり 9～13(東京都および大阪府では 9)、消防ポンプ自動車数は、人口30万人当たり26～46(東京都および大阪府では26)とした。また、消防水利は100 m×100 mの面積に1基と考え各地域の可住地面積に設置するものを基準値としている。筆者が、文献3)および文献13)を参考に計算し、作成したものである。

ればかなりの充足率になっていることがわかる。ただし、消防水利の放水能力や配置密度および耐震性については必ずしも満足されておらず、これらは重要な問題点である。とくに現有のこれら消防水利の耐震性はきわめて小さい。地震時には、上水道をはじめとする都市供給施設は至る所寸断し、これに付設されている消火栓は使用できなくなることが予想される。また、耐震性の防火水槽はあまり整備されていない状況である。たとえば最も震災対策の進んでいる東京都においても昭和55年12月の統計で、防火水槽の合計8,050基⁹⁾のうち1,418基（約18%）が耐震性のものにすぎない。

2. 5 結言

この章では、火災および防火対策の現況について概観した。火災の被害をできるだけ小さくするには、種々の対策が必要となるが、現状においては、つぎのような問題点が指摘される。

(1) 出火原因は、その大部分が失火であるので、住民への防災教育や訓練を行なうことが必要である。住民は、各種の災害に不安感を抱いているにもかかわらず、具体的な対策を行なっているとはいえない状況である。行政等による防災知識の普及、防災訓練が効果的に行なわれることが望まれる。

(2) 消防用設備については、主に初期消火のために設置するものであるが、法律で義務づけられている防火対象物においても完全に設置されていない。また、各家庭においても消火器等の器具が完備されているとはいえない。したがって、火災の現況からもわかるように、初期消火が行なわれずに、あるいは初期消火に失敗して延焼拡大した火災が多数あり、このような設備面の改善がなされなければ、今後もかなりの火災による被害は続くものと思われる。

(3) 住民による初期消火率は、平常時の火災の場合約55～60%、地震時の火災の場合約50%である。自主防災組織等の活動によって初期消火率を上げることは、ある程度可能であると考えられるが、過度の期待をせずに、役割分担を決めておくべきである。

(4) 平常時の出火の状況からみれば、夜間は昼間に比較すると、出火件数は少ないものの、一度出火すれば平均よりも大きな火災につながる。したがって、出火を抑える対策、火災感知器の整備等による火災の早期発見、初期消火対策に関する夜間の消防体制などについて検討する必要がある。

(5) 反対に昼間は、平均焼失面積は小さいが、出火件数が多いので、消火のための水利

施設として消火栓に多く依っている現状において、上水道の使用量のピーク時と重なる場合等には水压低下のため消火困難となるような事態も考えられる。さらに、地震時には、上水道は各所で寸断され、消火栓は使用できなくなる恐れがある。したがって、消火栓以外の消防の水利施設、たとえば防火水槽や井戸などを整備することを検討する必要があることが指摘される。

(6) 恒久的な対策としては、上水道のパイプラインの耐震性を向上させて、消火用水および生活用水を確保する対策も一方では、必要であると思われる。しかし、これを達成するには、莫大な費用と時間を必要とし、また、パイプラインの信頼性を100 %にすることは難しく、(5) の対策と平行して進めていくべきものと考えられる。

(7) 建物火災の「燃え」の条件として、火元延面積が大きければ延焼拡大しやすい傾向があることがわかったので、防火区画の設計等の工夫を要することが指摘される。

(8) 建物火災の「消し」の条件として、とくに放水の遅速が影響し、分析した例では、放水開始が10分未満の場合では、焼失面積は96.1㎡と小さな値となっている。

以上のように、通常の火災資料から、火災の実態に関する傾向を把握することができ、とくに、消火栓以外の消防水利施設を整備することが必要であることを指摘した。また、住民の意識調査によれば日頃から火災、地震等に対して危険・不安感を抱いており、種々の防災対策への要望が強いことがわかる。とくに、火災は平常時においても地震時においても発生することが予想されるので、多くの住民はこれに不安を示しており、消防力の強化という面からその被害を軽減させる対策を行なうことは重要な課題と考えられる。そこで、第3章では、実物大の火災実験および詳細に調査された火災資料を用いて、火災延焼機構の分析を行ない、さらに第4章で放水による延焼阻止効果を分析する。

第3章 都市火災[※]の延焼モデルに関する研究

3.1 緒言

前章においては、火災の現況を概観した。実際の火災データは、見方を変えれば、大きな犠牲を払いつつも多くの火災実験を行なっているとも考えることができる。しかし、前章で用いたような普通の火災データでは、火災の延焼機構を分析するには不十分である。そこで、この章では、実家屋群の建物を燃焼および延焼させた実験データおよび詳細に調査された実際の火災データを詳しく分析し、火災の延焼機構を究明する。

従来においては、いくつかの延焼速度式が提案されているが、これらは主として大火のデータから求めたものである。したがって、出火後約1時間以上の火災が次から次へと燃え移る場合の延焼状況を表わす式と考えられる。しかも、データは昭和20年代以前のものであるので、建物の構造や都市の形態もかなり異なっている状況を考えるとこれらの式では最近の都市へ適用しにくくなっているものと思われる。たとえば、次節で述べる浜田の式および堀内の式は、よく用いられている代表的なものであるが、実際の火災による延焼速度より大きな値をとることが指摘されている¹⁵⁾。

この章では、1棟あるいは数棟が延焼して焼止まる場合の建物火災を扱い、できる限り最近の火災データを用いて分析を行なう。とくに出火後約1時間程度の延焼状況をより詳しく分析し、次章における放水による延焼阻止効果を検討するための基礎とする。

3.2 従来の研究

本題に入る前に、従来における研究を述べその問題点について論じる。市街地火災の延焼速度に関する経験式としては、初期のものでは、単一の大火を分析した金原、土佐林の¹⁶⁾式、さらに多数のデータから分析した東京消防研究会の図、浜田、堀内、保野の式などがある。以下にその主な特徴を述べる。

3.2.1 金原の式¹⁶⁾

金原は、昭和15年1月15日12時半頃出火した静岡大火を調査して次の関係式を求めている。

※ 本論文では、消防白書等により分類される建物火災を扱うが、とくに多くの施設や構造物、建築物により構成されている市街地の火災について検討するものであり、以下ではこれを都市火災または単に火災と呼ぶ。

$$V = -1.67 + 44.82 W \quad (1-3-1)$$

ここに、 V ：風向き方向への延焼速度 (m/hr) [$60 \leq V \leq 400$]

W ：風速 (m/sec) [$3.4 \leq W \leq 5.9$]

3.2.2 土佐林¹⁷⁾の式

土佐林は、昭和21年5月8日18時半頃出火した新潟県中蒲原郡村松村の大火を分析して次のような関係式を求めている。

$$D_0 = k_1 \cdot T \frac{1}{a_0 - b_V (1 + \cos \theta)} \quad (1-3-2)$$

ここに、 D ：火元より火面までの延焼距離 (m)， T ：延焼時間 (min)

θ ：風下を 0° 、風上を 180° とする火元からの方向

k_1 ， a_0 ， b_V ：定数で上記の火災では、 $k_1 \approx 12$ [建物の疎な地区]、

$k_1 \approx 30 \sim 40$ [同密集地区]、 $a_0 \approx 3.0$ 、 $b_V \approx 0.79$ であったとしている。

3.2.3 東京消防研究会^{18),19)}の図

東京消防研究会が多数の大火資料を集めて、その結果提案した曲線が図1-3-1¹⁸⁾である。

図1-3-1 に図示された延焼速度の点は、つぎの2つの場合である。

- ① 平均延焼速度を焼止り線図から求め、延焼方向沿いに算出した。(図上では●印)
- ② 平均延焼速度を火災延焼等時線図より求め各等時区間ごとに算出した。(図上では○印)

図1-3-1 (a.風下側、b.風横側、c.風上側の延焼速度と風速の関係) から明らかなように、風速が増加するにしたがい延焼速度は二次曲線的に急激に増加する傾向が示されている。これらの延焼速度は出火後1時間もしくはそれ以上経過した後のものとみなすことができる。また、火災初期の延焼速度としては図1-3-2^{18),19)}が提案されている。強風時の資料がやや乏しいが、火災初期における風速の影響は、建物の外に火が出ない間は、すでに相当拵がった火災と比較してそれ程顕著でないことがわかる。

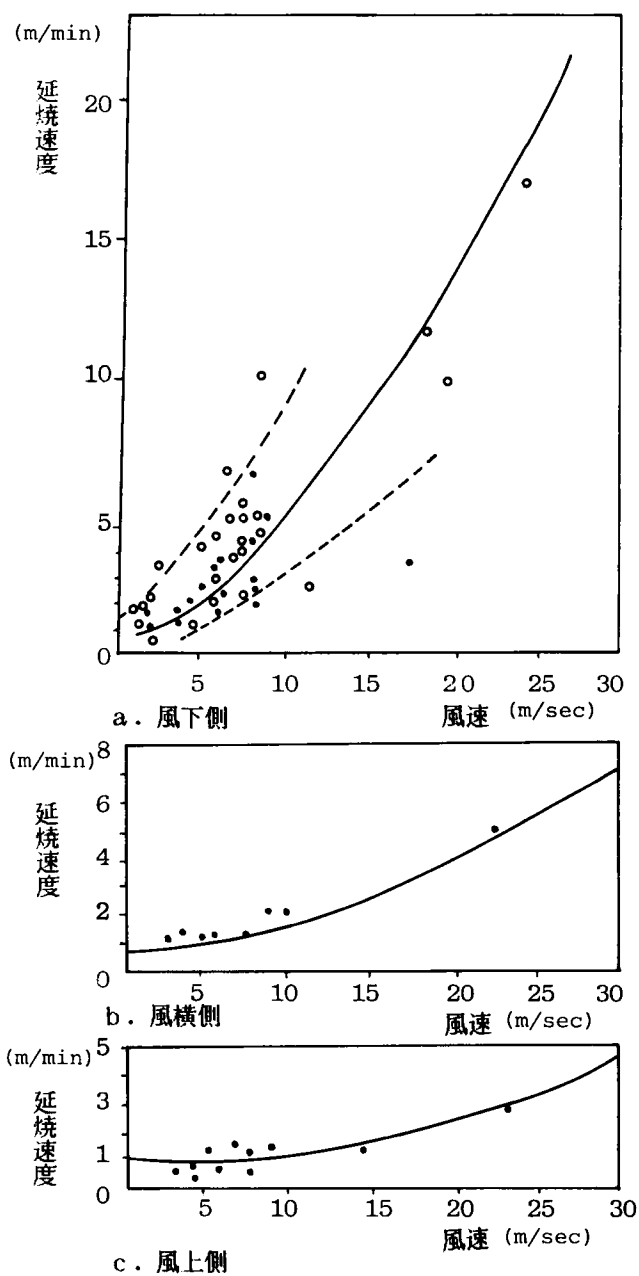


図 1-3-1 大火災時における木造市街地の延焼速度と風速の関係

18)

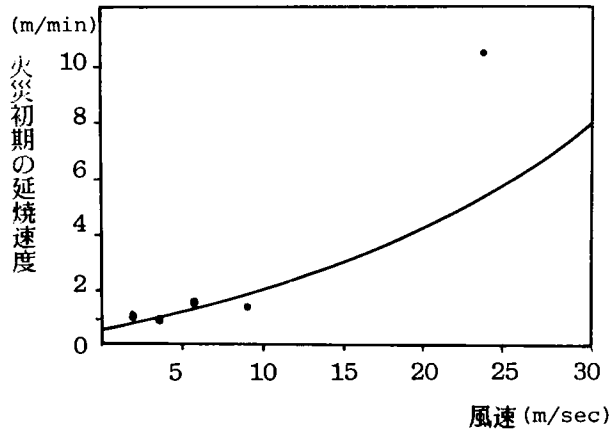


図 1-3-2 火災初期の延焼速度と風速の関係^{18),19)}

3.2.4 浜田・堀内の式^{20),21)}

浜田は普通木造建物の延焼速度式として式 (1-3-3) および (1-3-4) を提案している。²⁰⁾ 図 1-3-3 のように市街地における建物火災の状況をモデル化した場合を考え、建物火災はすべて 1 辺 a (m) の正方形としおり、それらがすべて隣棟間隔 d (m) で正しく配置されていると考える。火元建物火災の中心を出火点とし、これを平面上の原点と考えるものと^{20),21)} すると各方向別の延焼速度を示す式はつぎのようである。

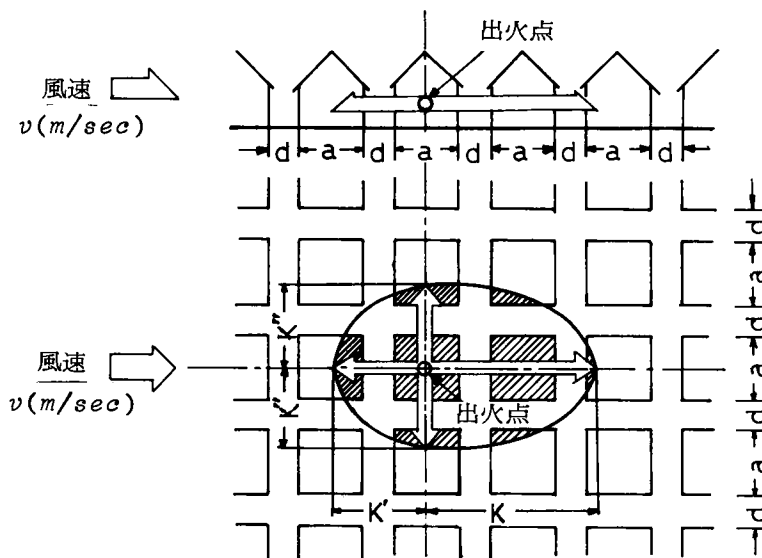


図 1-3-3 モデル化された市街地における火災延焼状況²¹⁾

風下側

$$t_0 = (3+3a/8+8d/D_1) / (1+0.1 v)$$

$$t_1 = (3+3a/8+8d/D_1) / (1+0.1 v+0.007 v^2)$$

ここに、 $D_1 = 5 + 0.5 v$

風上側

$$t' = (3+3a/8+8d/D') / (1+0.002 v^2)$$

ここに、 $D' = 5 + 0.2 v$

風横側

$$t'' = (3+3a/8+8d/D'') / (1+0.005 v^2)$$

ここに、 $D'' = 5 + 0.25 v$

t_0 : 出火より風下側隣家へ着火するまでの時間 (min),

t_1 : 風下側隣家よりさらに つぎの風下側隣家へ着火するまでの時間 (min)

t' : 出火により風上側隣家へ着火するまでの時間 (min),

t'' : 出火により風横側へ t' と同様に測った時間 (min)

v : 風速 (m/sec), D_1 , D' , D'' : 延焼限界距離(m)

なお、風下側へは延焼速度は時間経過とともに増大するものとし、つぎの式によって t および D を求めるものとする。

出火から10分以内 t_1, D_1

出火から11分～30分間 $t_2 = t_1 / 1.2, D_2 = 1.5 \cdot D_1$

出火から31分～60分間 $t_3 = t_1 / 1.4, D_3 = 3 \cdot D_1$

出火から60分以上 $t_4 = t_1 / 1.6, D_4 = 5 \cdot D_1$

式 (1-3 3)は、各方向別に外壁面という特定の位置における着火時間を示す形で表わされているために、任意時刻における「火面」の位置を示すには不便であるから堀内はこれをつぎの式ように変換している。

風下側

$$k = (a/2+d) + (x - T_0) / T_1 \cdot (a+d)$$

ただし、 $x \leq T_0$ のとき $k = (a/2+d) x / T_0$

風上側

$$k' = (a/2+d) + (x - T') / T' \cdot (a+d)$$

ただし、 $x \leq T'$ のとき $k' = (a/2+d) x / T'$

風横側

$$k'' = (a/2 + d) + (x - T'') / T'' \cdot (a + d)$$

$$\text{ただし、} x \leq T'' \text{ のとき } k'' = (a/2 + d) x / T''$$

k, k', k'' : x 分後における風下側, 風上側および風横側の延焼距離 (m)

T_0, T, T', T'' : 式 (1-3-3) の t_0, t, t', t'' と同じ。もしくは, 防火的木造物に対するつぎの式における $\tau_0, \tau, \tau', \tau''$ を用いて求められた着火時間 (min)

$$\tau_0 = (5 + 5a/8 + 8d/\Delta) / (1 + 0.1 v)$$

$$\tau_1 = (5 + 5a/8 + 8d/\Delta) / (1 + 0.1 v + 0.007 v^2)$$

$$\tau' = (5 + 5a/8 + 8d/\Delta') / (1 + 0.002 v)$$

$$\tau'' = (5 + 5a/8 + 8d/\Delta'') / (1 + 0.005 v)$$

$$\text{ここに、} \Delta = D / 2, \Delta' = D' / 2, \Delta'' = D'' / 2$$

(1-3-6)

実際の市街地では、100 % 普通木造建物の場合とか 100 % 防火的木造建物の場合ということとは少なく、両者が混在している。普通木造建物が ε % 防火的木造建物が η % の割合で混在している市街地に対しては、つぎの式 (1-3-7) によって求めた T_0, T_1, T' および T'' を用いて式 (1-3-5) の k, k', k'' を算出することができる。

$$T_0 = t_0 \times \varepsilon / 100 + \tau_0 \times \eta / 100$$

$$T_1 = t_1 \times \varepsilon / 100 + \tau_1 \times \eta / 100$$

$$T' = t' \times \varepsilon / 100 + \tau' \times \eta / 100$$

$$T'' = t'' \times \varepsilon / 100 + \tau'' \times \eta / 100$$

(1-3-7)

さらに堀内は、焼失面積としてつぎの式を提案している。

$$A = 1.5 n \delta k'' (k + k') \quad (1-3-8)$$

ここに、 A : 建物焼失面積 (m^2)

n : 建物の平均階数

δ : 平均建べい率 ($= a^2 / (a + d)^2$)

3.2.5 保野²²⁾の式

保野は、建物火災を面積 100 m^2 程度の住宅および店舗併用住宅を主とする「普通建物」の焼失面積に対する式 (1-3-9) および倉庫, 工場, 作業場, 病院, 学校などの「大規模建物」に対する式 (1-3-10) を提案している。これは、K 市における火災資料より統計的手

法を用いた解析を行ったものである。

普通建物：

$$A_1 = (0.765 v + 1.650 + 1.465 \sigma) x \quad (1-3-9)$$

ただし、 $0.765 v + 1.650 + 1.465 \sigma > 0$

$$3 \leq x \leq 15 \text{ (min)}, 0 \leq v \leq 10 \text{ (m/sec)}$$

大規模建物：

$$A_2 = \{ (-0.300 \sigma + 3.400) v + 4.570 \sigma + 2.800 \} x^{0.1165 \sigma + 1.350} \quad (1-3-10)$$

ただし、 $(-0.300 \sigma + 3.400) v + 4.570 \sigma + 2.800 > 0$

$$3 \leq x \leq 15 \text{ (min)}, 0 \leq v \leq 10 \text{ (m/sec)}$$

A_1, A_2 ：各群の建物の焼失面積 (m^2)

v ：風速 (m/sec)

x ：出火後の時間 (min)

σ ： $\sigma = 0$ (この場合焼失面積は平均値)

$\sigma = 1, 2$ および $\sigma = 3$ の場合の焼失面積以下に含まれるデータの割合は、それぞれ 84.1, 97.7 および 99.8% である。

3.2.6 従来の式の検討

従来の式において、保野の式を除けば火災の資料は主として大火をもとにしている。一般に大火時の延焼速度には飛火の影響を含んだものになっており、また出火後 1 時間あるいはそれ以上経過した場合のデータが多い。したがって、これらの式は、火災がつつぎに拡大していく場合の延焼状況を表わすものと考えられえ。しかし、通常の場合の火災には延焼を促進する要因ばかりでなく、抑制する要因も存在するので鎮火までの時間、とくに出火から 20～60 分程度の延焼状況は必ずしもうまく説明されていない。また、消火活動、とりわけ消防水利に絡んだ場合の延焼および延焼阻止に対する知識は、経験や勘に依りすぎている傾向があるように思われる。

以下に問題点をまとめると次のようである。

① 従来の研究によって、出火棟から他の棟へつつぎと延焼拡大 (類焼) していく場合の延焼速度式は定式化されている。ただし、適用範囲は出火から 20 分以内および 1 時間以上の時間の範囲に精度がよいものと考えられる。言いかえれば、20～60 分の延焼状況が

うまく説明されていないということである。

② 従来の式では、比較的大きな焼失面積となることが知られている。このことは、消防計画を策定する場合、安全側であると言えなくはないが、震災時には消火が可能であるかも知れないにもかかわらず、延焼範囲を過大に見積るために消火活動が無理であるから避難すべきであるというような結果を予測し、かえって危険側となる場合が考えられる。すなわち、震災時においても、延焼状況を正しく把握し、それに対処することが、場合によっては可能となるのではないと思われる。したがって、避難計画のみならず、積極的に消火活動をする事、とくに耐震性の防火施設の適切な整備を行なうことは重要であると考えられる。

③ 消火の研究はあまりされておらず、焼失面積を最小限度に抑えるには、どの程度の消防水利の確保と消防活動を行なえばよいかということを科学的に解明する必要がある。そのためには、出火から数棟が延焼するまでの火災状況をよりの確に把握する必要がある。そこで、次節では自治省消防庁によって行なわれた最近の火災実験結果について検討する。

3.3 延焼モデルの基本型^{23),24)}

3.3.1 概説

この節では、昭和54年8月に自治省消防庁消防研究所によって行なわれた大分県佐賀関町における実家屋群による大規模火災実験結果を分析する。図 1-3-4は、その火災実験^{25),26)}の焼失面積と時間の関係を示したものである。この場合の家屋群は、木造トタン葺板張り平屋4棟延804㎡（空地を含む）で、全焼失時間は50 minであった。また風速は、1.8 m/sec で、2箇所から点火を行なったものである。図 1-3-4によれば、焼失面積と時間の関係は、S字状の曲線となることがわかる。この場合は、出火棟からつぎつぎと3棟に延焼した場合であるが、消火活動を行なって延焼を阻止した場合や、たとえば2棟で焼け止まった場合には、図 1-3-5の破線のようにになると予想される。ところで、この関数関係を調べてみると、明らかに従来の式のような無限に増加する関数関係とはならず、多項式では3次式以上の関数あるいはその他の関数関係となることがわかる。いま、S字状の曲線として多項式とロジスティック曲線を挙げるができる。以下では、それらの関数にあてはめてみることにする。

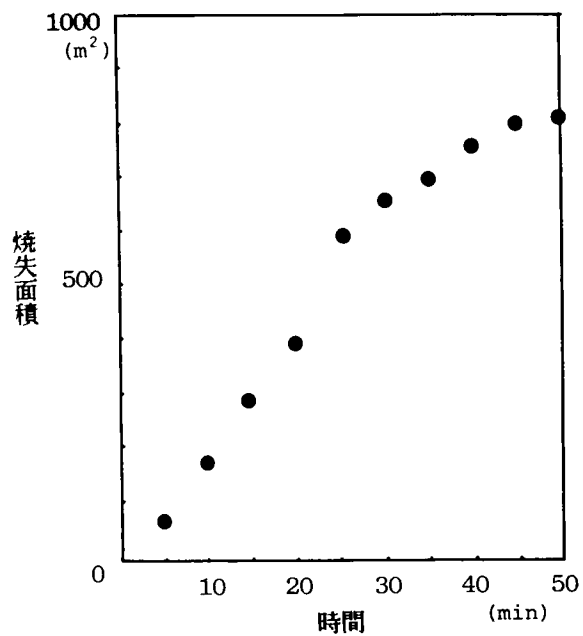


図 1-3-4 佐賀関火災実験における焼失面積と時間の関係

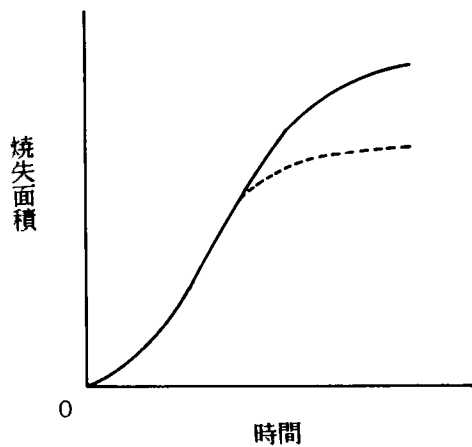


図 1-3-5 一般的な焼失面積と時間の関係

3.3.2 多項式回帰モデル

自治省消防庁消防研究所によって行なわれた佐賀関火災実験のデータを用いて、つぎの n 次多項式 (定数項 = 0)

$$A = b_1 x + b_2 x^2 + \cdots + b_n x^n \quad (1-3-11)$$

ここに、 b_1, b_2, \cdots, b_n : 係数

x : 出火からの経過時間 (min)

A : 焼失面積 (m^2)

の $n = 2 \sim 10$ に対し、最小 2 乗法により係数を求めて描いたものが図 1-3-6 である。ただし、文献 25) では空地を含む焼失面積と時間の関係が示されているが、図 1-3-6 には空地を除いた建物だけの焼失面積を示している。すなわち、調査資料には 5 分毎の同時延焼線図 (延焼動態図) が描かれているので、これより筆者が建物のみを算出したものであり、完全に延焼拡大するのに要した 50 分間のうちで、5 分毎に 10 点の観測値をプロットしている。

また、図 1-3-7 には、2~10 次式として回帰したときの各々の残差 2 乗和とその次数の関係を示す。この図より次数を増せば残差 2 乗和は減少し、曲線と観測値とのずれは小さくなることがわかる。ところが、図 1-3-6 に示されているように次数が大きくなるにつれて観測値と観測値の間で振動するような傾向を示すことがわかる。例えば、10 次式では、観測値を必ず通る曲線となり、残差 2 乗和は 0 となるが、区間の両端の観測値の間で大きな山が表われている。焼失面積は、時間の経過とともに増大し、減少することはないのであるから、このような曲線は火災の現象には適さない。したがって、これらのことを考慮すると、この場合の回帰多項式の次数は 3 次あるいは 4 次が適当ではないかと思われる。ただし、これらの場合でも $x = 45 \sim 50$ (min) の間でピークが表われ、火災の現象に合わない。

ところで、多項式の次数は、MAICE (Minimum AIC Estimation) と呼ばれる方法を用いれば、ある程度客観的に求めることができる。MAICE とは、回帰多項式の次数の決定に際し、次式で表わされる統計量 AIC を指標として、これが最小となる場合の次数を最適とする方法である。

27), 28)

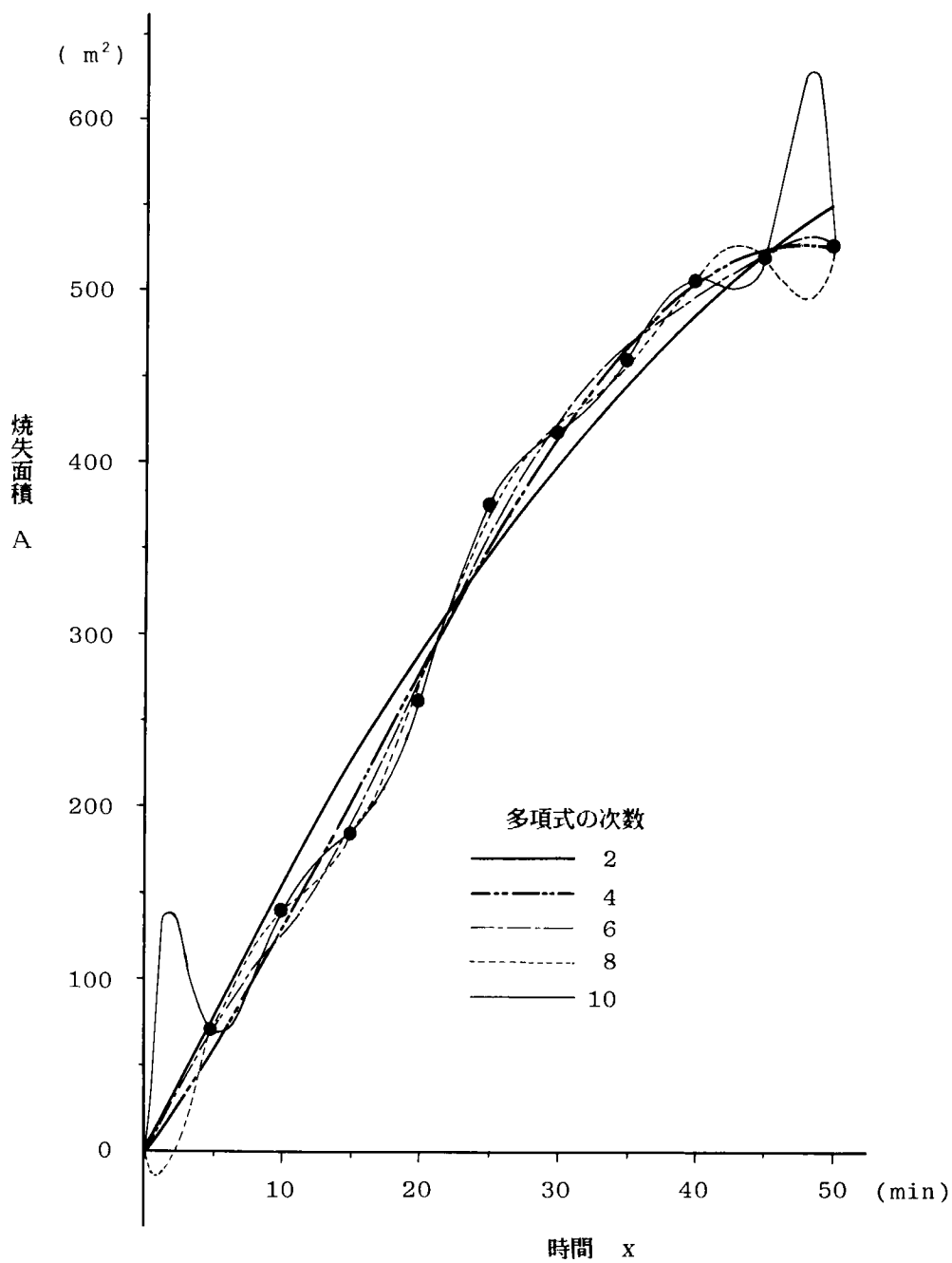


図 1-3-6 焼失面積と時間の関係（多項式のあてはめ）

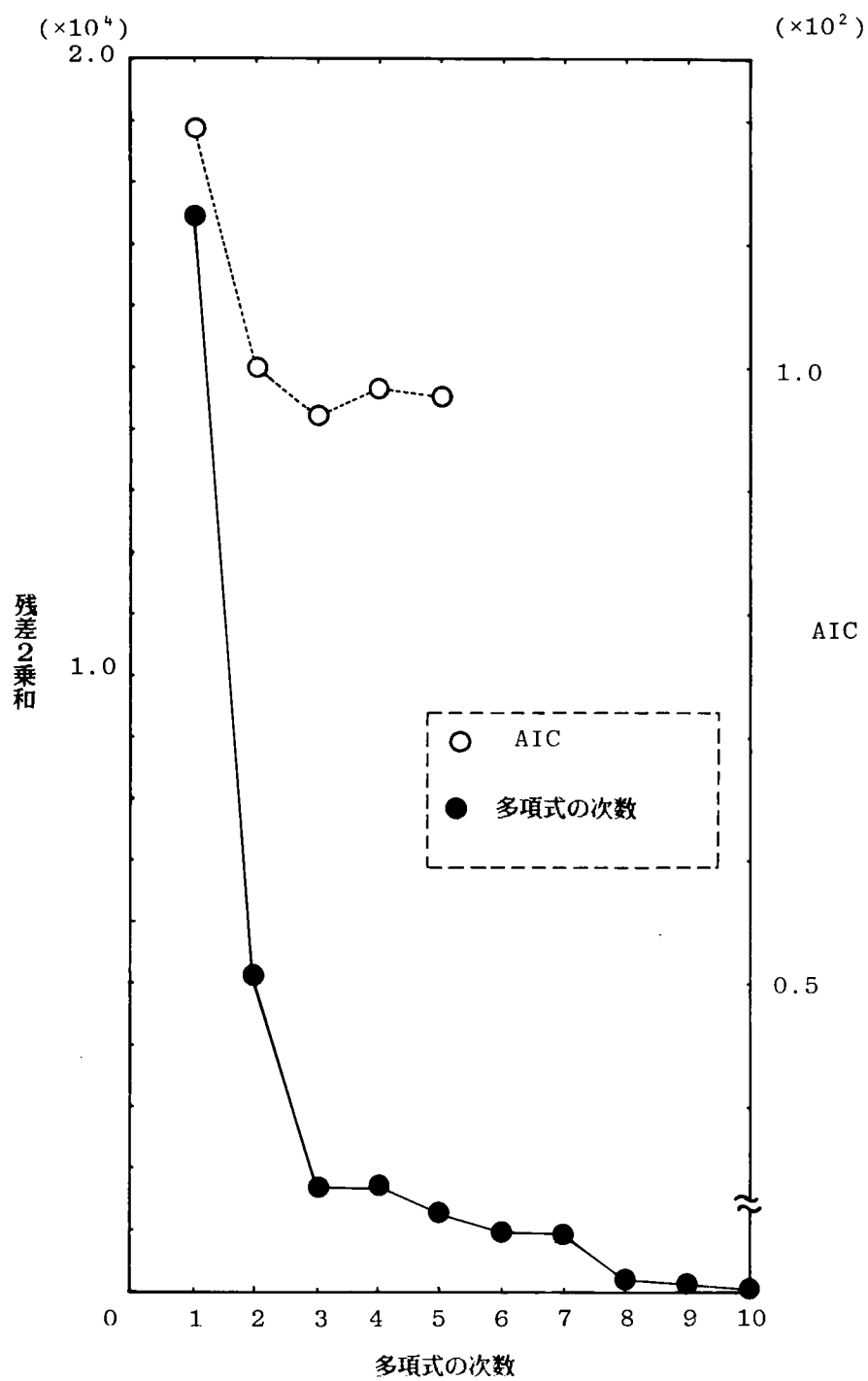


図 1-3-7 残差2乗和およびAICと多項式の次数の関係

$$AIC = m \cdot \ln(S) + 2n + C \quad (1-3-12)$$

ここに、 m ：データ数

n ：次数

S ：残差2乗和

C ：定数 ($C = m \cdot \ln(2\pi e / m) + 4$)

この式によってAICを求めてみると、図 1-3-7のようになる。これより、1次～5次のうちで3次式が適当であることがわかる。ただし、次数とデータ数との関係は

$$\frac{(n+1)}{m} < \frac{1}{10} \quad (1-3-13)$$

となる範囲で用いるべきであるとされており、例えば $n=3$ とすると $m=40$ 以上となる。²⁷⁾上記のデータは $m=10$ であり、不足しているが、参考のために求めてみたもので、厳密には何らかの方法でデータ数を増す必要がある。

3.3.3 ロジスティック曲線による延焼モデル

(1) ロジスティック曲線

次式で表わされる y と x の関係式

$$y = \frac{G}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (1-3-14)$$

ここに、 G , a , c ：定数、 e ：自然対数の底

は、例えば人口増殖曲線の一種でロジスティック曲線と呼ばれる。あるいは、式(1-3-14)は、化学的には単分子触媒反応において、 y を時刻 x の反応生成物量、 Δx 時間での y の変化 Δy が、その時刻に存在する y と反応物質の初期量を G として、 G に対する差($G-y$)と G の両方に比例する形の微分方程式(自己触媒方程式)

$$\frac{dy}{dx} = \lambda (G-y)y \quad (1-3-15)$$

ここに、 λ ：比例定数 ($\lambda = a/G$)

の解として与えられる。

さて、 $y=A$ として

$$A = \frac{G}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (1-3-16)$$

ここに、 A ：焼失面積（ m^2 ）

x ：出火からの経過時間（ min ）

G ：建築面積（ m^2 ）

a, c ：定数

とする。式（1-3-16）の概略を図 1-3-8に示す。またこの式の性質としては、主につぎの点が挙げられる。

① $(c, G/2)$ で変曲点、点対称

$$\textcircled{2} \quad \frac{dA}{dx} = \frac{aG}{4} = \frac{\lambda G}{4} \quad (1-3-17)$$

③ $x = -\infty$ で $A = 0$

④ $x = \infty$ で $A = G$

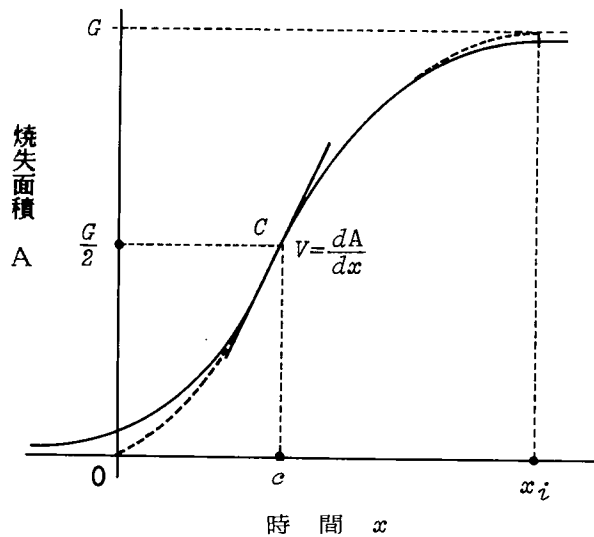


図 1-3-8 ロジスティック 曲線の概略

式(1-3-16)のパラメータ G 、 a および c を決定する方法は大別して(1)解析的な方法と(2)図式解法とに分けられる。解析的な方法には最小2乗法がある。式(1-3-16)は決定しようとするパラメータに対して非線形の関数であるので、 G が既知のもとに、対数による線形化を行なって通常の最小2乗法により G 、 a および c を求める方法(対数線形法と呼ぶ)および非線形最小2乗法によって求める方法(非線形法と呼ぶ)がある。図式解法には、 V 法と定差図法を挙げることができる。以下にこれらの解法についての説明を行なう。

(2) 最小2乗法による係数決定方法について

(a) 対数線形法

式(1-3-16)を変形して

$$G/A - 1 = \exp \{-a(x - c)\}$$

両辺の対数を取り

$$\ln(G/A - 1) = -a(x - c)$$

ここで、 $Y = \ln(G/A - 1)$ 、 $b = ac$ とおくと

$$Y = -ax + b \quad (1-3-18)$$

となる。これは、 x に関して線形であるので通常の最小2乗法を適用して、 m 個の観測値 (x_1, A_1) 、 $(x_2, A_2) \cdots (x_m, A_m)$ より、 a および b を求めることができる。また、この a および b より c を求めることができる。この方法は、先に述べたように G が既知の場合に解析可能である。

一般に、このような対数線形法はその計算が簡単なために好んで用いられる。しかし、最小2乗法の原理においては、誤差は正規分布しているものと仮定しているが、対数線形法では、誤差の対数が正規分布すると仮定することになる点に注意する必要がある。すなわち、非線形パラメータを有するモデル式に対して最小2乗法の原理を厳密に適用するには、次に述べる非線形法を用いる必要がある。

29), 30)

(b) 非線形法

式(1-3-16)より残差を

$$\begin{aligned} f_1 &= A_1 - G / \{1 + \exp(-a(x_1 - c))\} \\ f_2 &= A_2 - G / \{1 + \exp(-a(x_2 - c))\} \\ &\vdots \\ f_m &= A_m - G / \{1 + \exp(-a(x_m - c))\} \end{aligned} \quad \} \quad (1-3-19)$$

と表わす。残差2乗和は

$$S = f_1 + f_2 + \cdots + f_m \quad (1-3-20)$$

となる。ここでベクトル表示すると

$$S(Z) = \|f(Z)\|^2 = f(Z)^T f(Z) \quad (1-3-21)$$

$$\text{ここに、} Z = [G, a, c]^T$$

$$f = [f_1, f_2, \cdots, f_m]^T$$

T: 転置を表わす

となる。最小2乗法の原理より残差2乗和Sを最小にするときのG、aおよびcが各々の最確値である。最確値は、近似値を与えて数値的に繰り返し計算を行ない、ある基準（停止則）のもとで収束させて求めることができる。すなわち、近似値 $Z^k = [G, a, c]$ のまわりでfをテーラー展開して2次以上の項を省略すると

$$f(Z) \approx f(Z^k) + W \Delta Z \quad (1-3-22)$$

$$\text{ここに、} W = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial G} & \frac{\partial f_1}{\partial a} & \frac{\partial f_1}{\partial c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial G} & \frac{\partial f_m}{\partial a} & \frac{\partial f_m}{\partial c} \end{bmatrix}, \quad \Delta Z = Z - Z^k$$

$$Z = Z^k$$

したがって、観測方程式は

$$WZ = WZ^k - f(Z^k) \quad (1-3-23)$$

となり、これより正規方程式を作ると

$$W^T WZ = W^T m \quad (1-3-24)$$

$$\text{ここに、} m = WZ^k - f(Z^k)$$

となる。この式の解を Z^* とすると

$$Z^* = [W^T W]^{-1} W^T m \quad (1-3-25)$$

となる。 Z^* は Z^k よりも解に近づいているものと期待される。 Z^* を改めて Z^k とし上述の計算を繰り返し、所定の精度で収束させたときの Z^* を最確値とする。ただし、常に収束するとは限らず、発散する可能性があるが、最近の数値的最適化アルゴリズムと数値³⁰⁾的線形代数の発達により、安定した解を得るための種々の技法が考案されている。

(3) 図式解法による係数決定方法について

(a) V法

つぎに、粘性曲線の係数を近似的に求める方法（V法と呼ぶ）について述べる。図 1-3-8 において $A \approx G/2$ で火災資料より滑らかな曲線を描き $V = dA/dx$ のほぼ最大値（接線の角度の最大値）およびその時刻 $x = c$ を図上より求める。すなわち、式 (1-3-17) において

$$V = \lambda G/4 = a G/4$$

であるから、 G が判明しておれば、

$$a = 4V/G$$

によって a が求まることになる。また、 $A \approx G/2$ のとき、 $x \approx c$ （変曲点の x の値）として c を求めることができる。

(b) 定差図法³¹⁾

ここでは、消火用水のかけられていない部分の火災資料によって式 (1-3-16) の係数を決定する方法（定差図法と呼ぶ）について述べる。

式 (1-3-16) の逆数をとって

$$1/A(x) = \{1 + \exp(-a(x - c))\} / G \quad (1-3-26)$$

h を単位変化量として式 (1-3-26) を定差式の形式で変形すれば

$$1/A(x + h) = \{1 + \exp(-a(x + h - c))\} / G \quad (1-3-27)$$

つぎに、式 (1-3-26) $\times \exp(-ah)$ を求め、式 (1-3-27) から引いて整理すると

$$1/A(x + h) = \exp(-ah)/A(x) + \{1 - \exp(-ah)\} / G \quad (1-3-28)$$

となる。式 (1-3-28) は、 $1/A(x + h)$ と $1/A(x)$ との間に直線関係があり、その傾きは $\exp(-ah)$ であることがわかる。したがって、この図形の性質より a を求めることができる。すなわち、図 1-3-9 に示すように傾きを θ とすると

$$\tan \theta = \exp(-ah)$$

対数をとって

$$-ah = \ln(\tan \theta) \quad (1-3-29)$$

ここで、 $h = 1$ とおけば

$$a = -\ln(\tan \theta) \quad (1-3-30)$$

となる。なお、一般に $1/A(x + h) < 1/A(x)$ であるから、 $\theta < 45^\circ$ となる。したがって、式 (1-3-29) の傾きは、 $\tan \theta < 1$ となるから、 $[\ln(\tan \theta)] < 0$ 、 $a > 0$ と

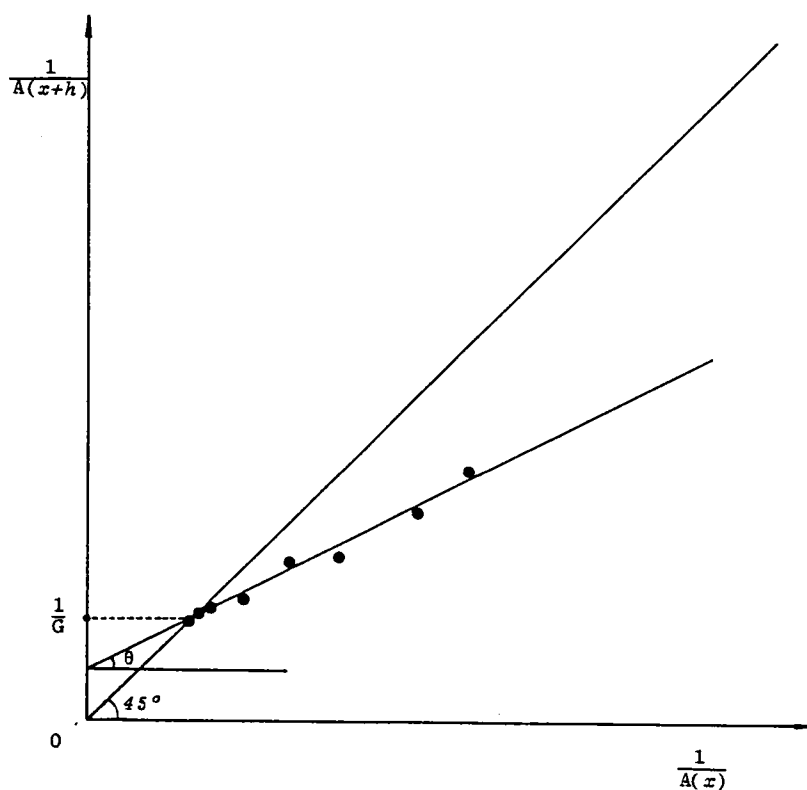


図 1-3-9 $\frac{1}{A(x+h)}$ と $\frac{1}{A(x)}$ の関係

なり、 $\tan \theta \rightarrow$ 大のとき、 $a \rightarrow$ 小となる。

いま、式 (1-3-28) において $1/A(x+h) = 1/A(x)$ とすれば

$$\{1 - \exp(-ah)\} / A(x) = \{1 - \exp(-ah)\} / G \quad (1-3-31)$$

したがって

$$1/A(x) = 1/A(x+h) = 1/G$$

となる。すなわち、図 1-3-9において式 (1-3-28) の直線と 45° の直線との交点における $1/A(x)$ の値は $1/G$ を与える。

ところで、式 (1-3-17) より $a = \lambda G$ であるから

$$\lambda = [-\ln(\tan \theta)] / G$$

となり λ が求まる。

また、式 (1-3-26) において、 $X = \exp(-ax)$ とおけば

$$1/A(x) = \{1 + \exp(ac) \cdot X\} / G \quad (1-3-32)$$

となる。ここで、 $1/A(x)$ と X の関係をプロットすれば、図1-3-10のように直線となり、その傾きは $\exp(ac) / G$ となって、これより c が求められることになる。すなわち

$$\tan \theta' = \exp(ac) / G$$

対数をとって、 c について解くと

$$c = [\ln(\tan \theta' \cdot G)] / a \quad (1-3-33)$$

となる。

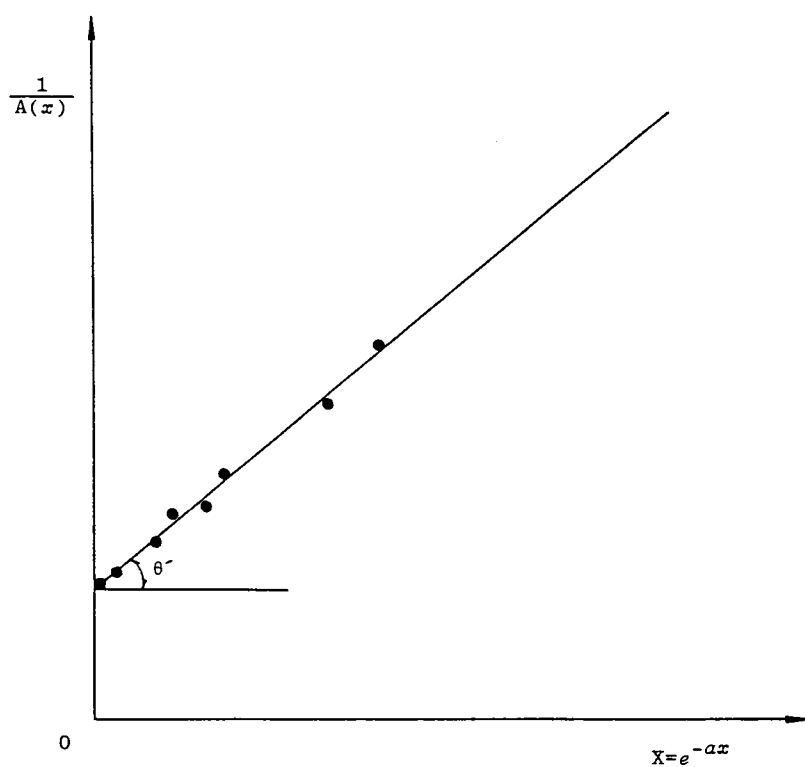


図 1-3-10 $\frac{1}{A(x)}$ と e^{-ax} の関係

このように定差図法によって得られた係数、すなわち関数の形を規定する母数の推定値は近似的なものであるから、それらの信頼区間は推定できない。したがって、2つの関数の間の差を検討することはできない。しかし、火災資料のようにかなりの誤差を含む解析には、係数をより正確に推定するための出発点となる近似値が必要である。この意味で、定差図法による解は有用であるものと考えられる。

(4) 解析結果

以上の4つの方法（対数線形法、非線形法、V法および定差図法）によって前述の佐賀関火災実験のデータからロジスティック曲線の係数を求めたものが、表 1-3-1である。

表 1-3-1 延焼速度式（ロジスティック曲線）の係数の推定値

係数	対数線形 最小2乗法	非線形最小2乗法		V 法	定差図法
G	528.4 *	528.4 *	544	528.4 *	529
a	0.143	0.130	0.123	0.131	0.138
c	18.9	19.3	19.8	19.8	19.1

* 既知の値

非線形法では、Gを既知とした場合と未知とした場合を示している。なお、非線形法の解法のうち、マルカート法および改訂準ニュートン法を用いて計算したもので、収束判定は

$$\|Z^{k+1} - Z^k\|_{\infty} < \varepsilon_0 \cdot \max\{1, \|Z\|\} \quad (1-3-34)$$

ただし、 $\varepsilon_0 = 1.0 \times 10^{-5}$ 、 $\|Z^k\|_{\infty} = \max\{|G^k|, |a^k|, |c^k|\}$ とした。

なお、Gの値を既知および未知として解析したのは、つぎの理由による。実際の火災資料では、消火等により延焼を阻止している。消火活動をしなかった場合には、どの程度延焼したかということを知りたいことがあるが、非線形法および定差図法を用いれば、このGを推定することができることを示した。佐賀関火災実験の場合には、実際のGの値 528.4に対し、非線形法では 544、定差図法では 529と若干大きめの値となっている。

つぎに、非線形法を用いて、G、aおよびcを推定した場合の詳しい経過について述べる。マルカート法による残差2乗和とGの停留値の関係を図1-3-11に示す。図の各点は種

々の初期値に対する停留値であって、一度の計算で最適解が得られなかった。すなわち、図のようにかなりの計算を行なって残差2乗和が最小となる点を求めなくてはならない。図1-3-12～図1-3-14には、 G 、 a および c の初期値と停留値の関係を示す。図1-3-12の G については、初期値が500以下のときは、大体520程度に停留し、初期値が500を越えると初期値と停留値が等しくなっている。また、 a および c については、それぞれ図1-3-13および図1-3-14に示すが、各々 a および c の初期値に大きく影響されているようである。さらに、この方法（マルカート法）の特徴としては、初期値が最適値よりも小さな場合は、最適値のやや低めに停留し、初期値が最適値よりも大きな場合は、最適値より高めに停留することが挙げられる。

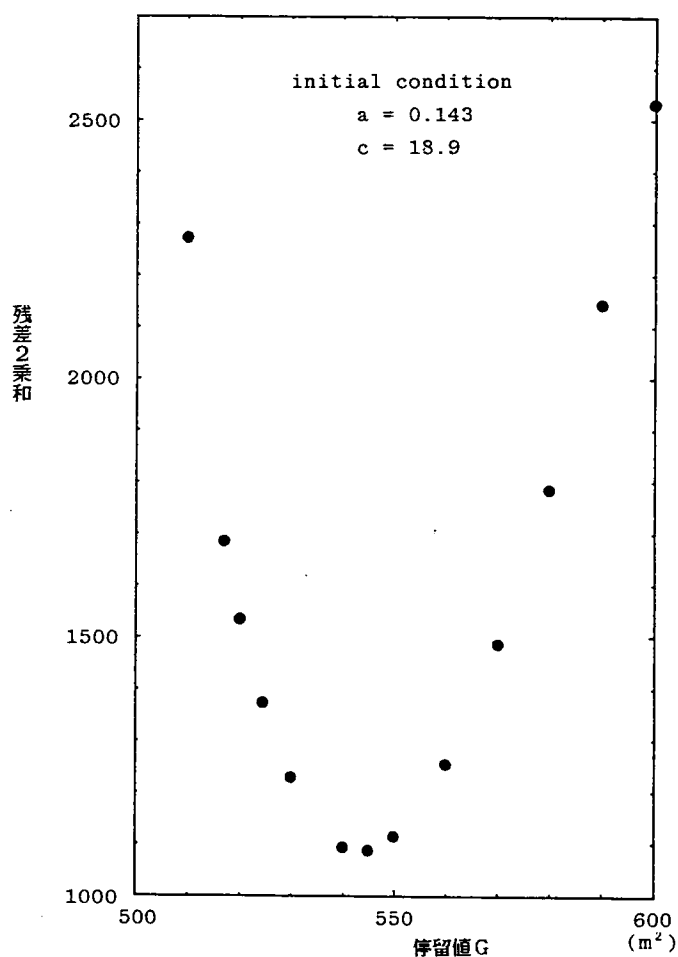


図 1-3-11 残差2乗和と停留値 G の関係

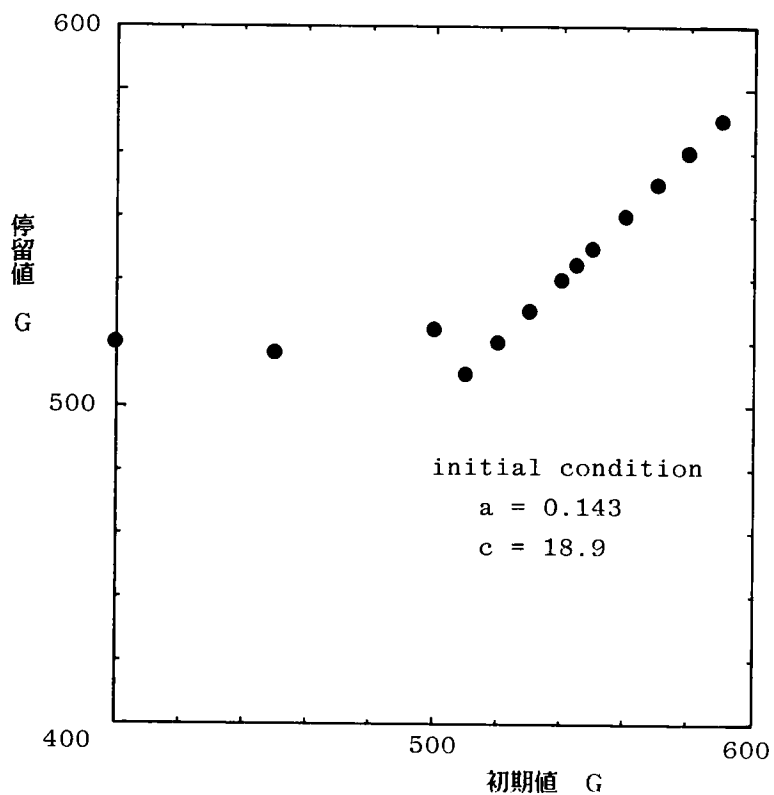


図 1-3-12 係数 G における停留値と初期値の関係

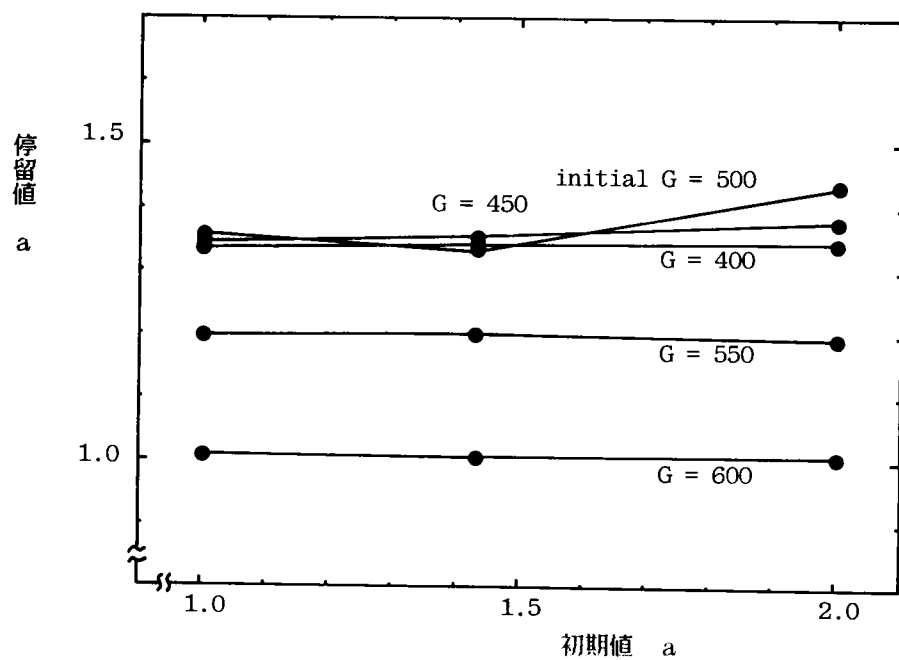


図 1-3-13 係数 a における停留値と初期値の関係

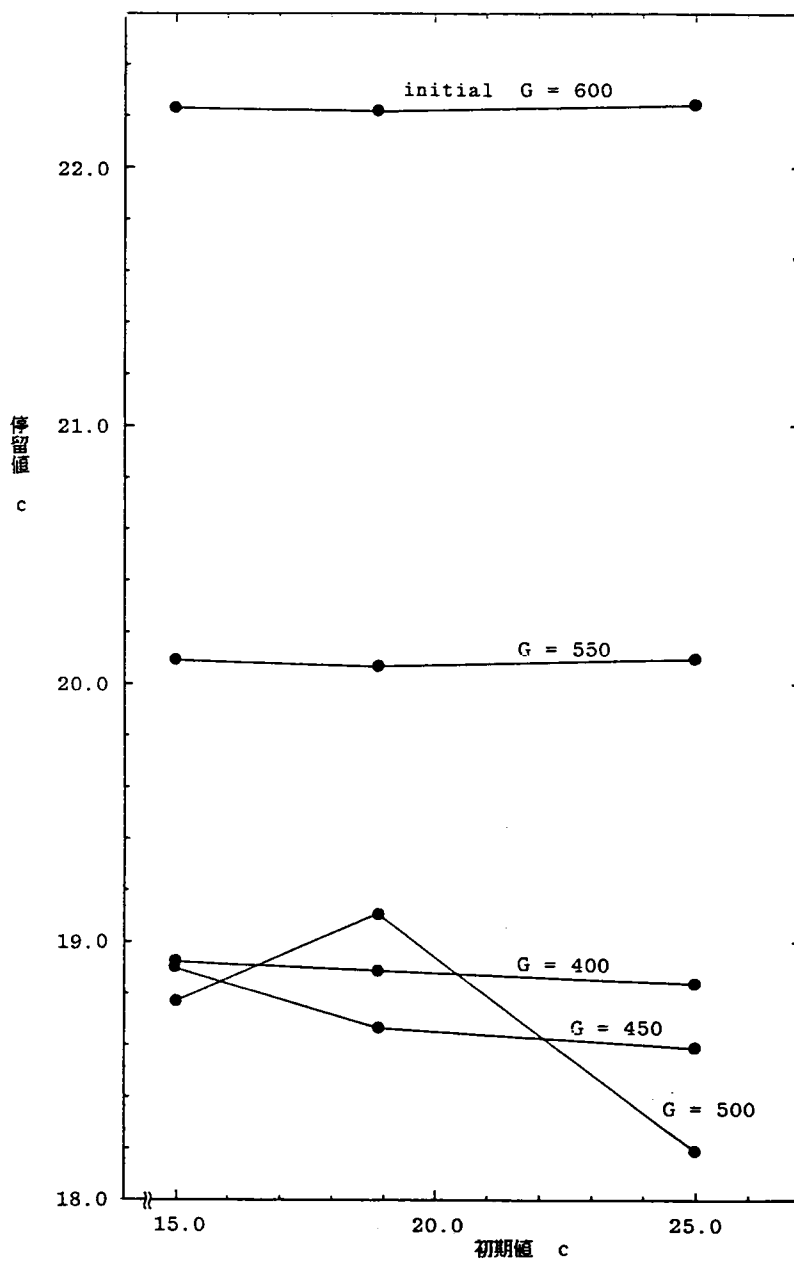


図 1-3-14 係数 c における停留値と初期値の関係

つぎに、マルカート法と改訂準ニュートン法の収束状況の例を表 1-3-2に示す。いずれの方法も初期値が最適値にかなり近い場合(case 2)では、収束の仕方がよい。両者を比較すれば、改訂準ニュートン法の方がやや収束性がよいようである。しかし、初期値が最適値と離れている場合には、両者とも収束しなかったり、十分収束しないうちに計算が打ち切られる。

表 1-3-2 非線形最小2乗法による各初期値における収束状況

初期値・停留値		初期値	停 留 値	
項 目			マルカート 法	準ニュートン 法
case 1	G	300.0	300.1	424.8
	a	0.143	0.2637	1.913
	c	18.9	11.41	15.14
	残差2乗和		14051.	70491.
case 2	G	500.0	524.8	543.6
	a	0.143	0.1319	0.1226
	c	18.9	19.12	19.83
	残差2乗和		1370.3	1035.4
case 3	G	1000.0	1000.	*
	a	0.143	0.0567	*
	c	18.9	38.72	*
	残差2乗和		14663.3	*

* 異常終了

以上のように、非線形法は初期値の与え方によって収束値（または停留値）が異なるため、総当たりに初期値を変えて計算を行なって最適解をみつけないければならない。もち

ろん、上の計算例のように、図1-3-11～図1-3-14のような傾向がみつければ最適値は比較的簡単に求まるが、適当な近似値が得られない場合や、各停留値の間の傾向が不規則な場合には、かなりの計算量が必要となるものと思われる。また、表 1-3-2のcase 3の場合の改訂準ニュートン法のように収束しないことは問題である。

一方、対数線形法および簡便法であるが繰り返し計算は必要とせず、反復なしに係数を求めることができるので、これらの方法によって推定した係数を非線形法の初期値として与える方法などによって収束性をよくすることができると考えられる。

さて、パラメータを数学的に厳密に求める方法について述べてきたが、工学的な解析をする場合には、データの精度に応じたパラメータの決定法を考えることが合理的である。すなわち、実際の火災データの精度は、一般に佐賀関火災実験のように詳しく調査されたものに比べて劣ることが考えられる。したがって、解法のみを精選しても、結果的に無意味となる場合も考えられる。これらを総合的に考えると、表 1-3-2に示されるように、実用上は簡便法で求めた値も精度的に十分満足できるものと考えられる。さらに、簡便法のうちで定差図法は、 G が既知でなくてもパラメータの推定が行なえる点で対数線形法に比べて有用な方法である。

3.3.4 解析結果の検討

焼失面積と時間の関係を表わす延焼モデル式として、まず多項式を考えた。その次数の最適なものとしては、MAICE法を用いるとすれば3次が適当であることがわかった。しかし、火災の現象からすれば、式の性質として単調増加関数であることが挙げられ、多項式ではこの性質を満足することは難しい。フーリエ級数等による方法でも同様な結果となるものと思われる。そこで、筆者は、単調増加関数でありSカーブの代表的な関数としてロジスティック曲線を用いることを提案した。ロジスティック曲線のパラメータは3次式と同数の3個であり、残差2乗和は3次式より小さい。一方、ロジスティック曲線は、単分子触媒反応における自己触媒方程式の解曲線であって、図形の類似性より、火災の延焼モデルとしてはよさそうである。つぎに、ロジスティック曲線のパラメータの決定方法は、厳密には非線形法によるべきであるが、収束性や簡便性から考えて、実用的には定差図法で差し支えないと考えられる。

ところで、ロジスティック曲線を表わす式(1-3-16)のままでは、 $x=0$ のとき $A=0$ とならず、また $x=x_i$ (全焼失時間)のとき $A=G$ とならない。この点は、つぎのような修正

を施すことによって決定される。すなわち、式 (1-3-16) を

$$A = \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + e^{-a(x-c)}} - \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + e^{a \cdot c}} \quad (1-3-35)$$

ここに、 n : 修正係数

$$\varepsilon = \frac{G}{1 + e^{a \cdot c}}$$

とすればよい。図解的に示すと図1-3-15のようである。まず原点を通るようにするには式 (1-3-16) から

$$\varepsilon = \frac{G}{1 + e^{a \cdot c}}$$

を引けばよいが、このときの状態が図1-3-15の実線である。これでは曲線が全体的に下がってしまうので、分子 ($G + n \cdot \varepsilon$) によって上限を引き上げる。この場合、 $x = x_i$ でちょうど $A = G$ となるように係数 n を加減する。このようにして佐賀関火災実験の場合の延焼モデル式を修正したものが図1-3-16である。また、図中には佐賀関火災実験の場合に相当する堀内の式 (A_H) を示す。 A_H は式 (1-3-8) より求めたもので、この場合の条件は、風速は $v = 1.8\text{m/sec}$ とし、防火木造と普通木造建物の比を 75 : 25、建ペイ率を 0.6、平均建物階数は 1 とした。図1-3-16のように、従来に式と比較すれば斜線部分に差が生じていることがわかる。

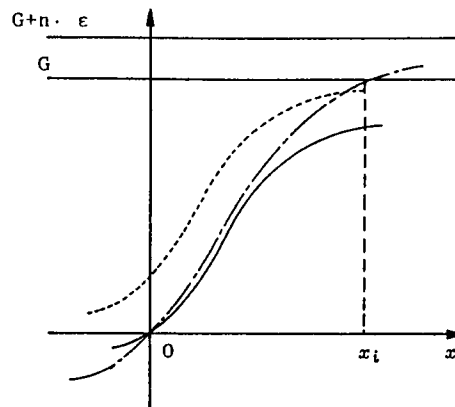


図 1-3-15 ロジスティック 曲線の修正

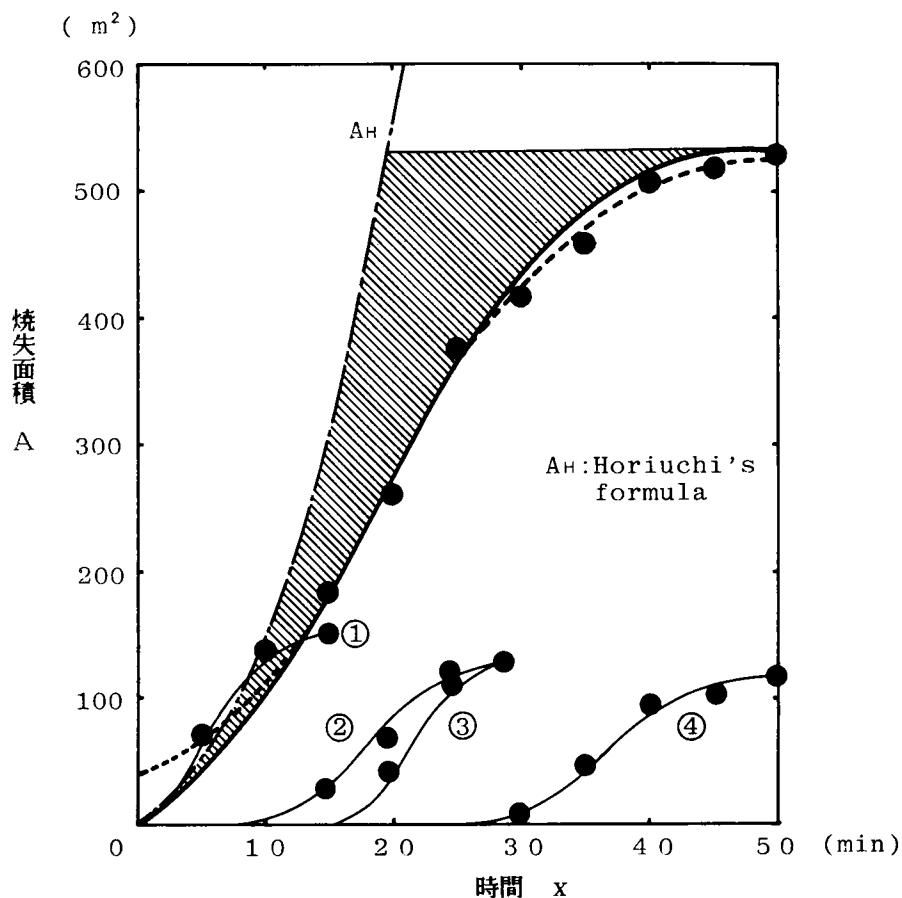


図 1-3-16 佐賀関火災実験における各棟の延焼状況および堀内の式との比較

35) 3.4 延焼モデルの提案

前節では、延焼速度は基本的にロジスティック曲線を考えればよいことが明らかにされた。ここでは、ロジスティック曲線を前提にして実際に適用可能な延焼モデルを提案する。

3.4.1 延焼規模が延焼モデルのパラメータへ与える影響

表 1-3-3に佐賀関火災実験の各々の延焼棟別についての延焼モデル式（ロジスティック曲線）の係数の推定値を示す。図 1-3-16 には、それらの曲線を細線で示す。太い実線は、4棟

表 1-3-3 佐賀関火災実験における各棟の延焼速度式（ロジスティック曲線）の係数値（最小2乗法による）

番 号	G	a	c	n	備 考
①	804.0	0.150	19.5	1.20	空地を含む4棟(39,40,41,42号棟)の合計したもの
②	528.4	0.143	18.9	1.17	空地を含まない4棟(同上)の合計したもの
③	149.5	0.423	5.20	1.07	41号棟,出火棟(室内2火点)
④	131.7	0.329	12.5	1.06	40号棟,延焼棟
⑤	130.5	0.460	6.51	1.35	42号棟,延焼棟
⑥	116.7	0.363	12.0	1.01	39号棟,延焼棟
⑦	121.3	0.293	9.95	1.09	45号棟,単独火災(室外2火点)

がつぎつぎと延焼して行ったものである。すなわち、各棟の延焼モデル式もロジスティック曲線で表わされ、全体の延焼モデル式もロジスティック曲線で表わされることを示しており、建物群全体の刻々の焼失面積を A とし、各棟の焼失面積を A_j とすれば

$$A = \Sigma A_j = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad (1-3-36)$$

ただし、 Σ ：各時刻で $j=1,2,\dots$ 棟の焼失面積加えることを意味する

となる。ところで、建物群全体の延焼モデル式

$$A = G / \{1 + \exp(a(x - c))\}$$

と各棟単独の延焼モデル式

$$A_j = G_j / \{1 + \exp(a_j(x - c_j))\}$$

のパラメータ $\{G_j, a_j, c_j\}$ の関係について考察する。

まず、 $G = \Sigma G_j$ となることは物理的条件より明らかである。すなわち、全建物群の建築面積 G は、これをを構成する各建物の建築面積 G_j を加え合わせたものである。

しかし、 a および c については単純に加え合わせたものとはならない。なぜならば、各建物は同時刻に延焼し始めるのではなく、時間がずれて延焼していくこと、およびモデル式自体がパラメータ $\{a, c\}$ に関して非線形であって、 $\{a_j, c_j\}$ を単純に加えたものではないことは容易に理解されよう。したがって、以下でこれらの関係について検討を行なう。

(1) パラメータ a について

式 (1-3-16) のパラメータ a はこの値が大きくなれば、焼失時間が小となり、a が小さくなれば焼失時間が大となる。また、表 1-3-3 によれば、G が大となれば a は小となっている。これは G が大きい場合 (4 棟が延焼した場合) には、隣棟に燃え移る時の時間の遅れが影響しているものと考えられる。そこで、a と G の関係は、 $a = \beta G^r$ (β および r は定数。ただし、 $r < 0$) と表わされるものと考えて、表 1-3-3 における出火 2 点の③を除いた④⑤⑥と②により、 β および r を求めれば次のように近似される。

$$a = 10.82 G^{-0.690}$$

さらに、この式を次のように変形する。

$$a = (b / G^r) \times V_0$$

この式は、基準建物 (平均的な一棟) の建築面積 G を代入したときに、 $a = V_0$ となるようにしたものである。V₀ は、この場合は一棟平均の建築面積 G = 126.3 における一棟単独の延焼モデル式の係数 a の値 (0.384) である。また、 $b = 28.18$ 、 $r = 0.690$ であり、
結局

$$a = (28.18 / G^{0.690}) \times 0.384 \quad (1-3-37)$$

と表わすことができる。式 (1-3-37) の $28.18 / G^{0.690}$ を焼失時間の遅れを表わす係数と考えて a の低減係数 (α と記す)、 $G^{0.690}$ を延焼抵抗係数 ($R = G^r$: r は延焼抵抗係数定数) と呼ぶことにする。この R は、建物構造、隣棟間隔および周辺の工作物や樹木等によって異なると考えられ、各地区あるいは各都市の建物および周辺の状況により値が変わるものと推定される。式 (1-3-37) の 28.18 は、抵抗係数 R に基準の G の値、すなわちここでは表 1-3-3 の④⑤⑥の G の平均値 126.3 を代入した値であり、a の低減係数定数 (b と記す) と呼ぶ。さて、式 (1-3-37) の特徴をまとめれば、出火建物の基準建築面積が、 $G = 126.3$ のとき $\alpha = 1$ と考えて、この場合 $a = 0.384$ であり、 $G \rightarrow$ 大、 $\alpha \rightarrow$ 小、 $a \rightarrow$ 小となるものである。低減係数 α は、浜田の式によって示されている風下、風上、風横側の隣家へ着火するまでの時間、風速、隣棟間隔および建物の長さの関数で示されているものと類似している。この α の場合には、建ぺい率により異なると共に、建物周辺の植木、塀はどの延焼阻止要因によっても異なるのでその点が浜田の式と意味がやや異なっている。

(2) パラメータ c について

パラメータ c は、式 (1-3-33) によって、 G および a の関数として表わされることがわかる。すなわち

$$c = [\ln(\tan \theta' G)] / a$$

である。表 1-3-3における④⑤⑥と②の $\tan \theta'$ を定差図法により求めれば、 a との関係で次のように近似することができた。

$$\tan \theta' = 5.71 a^{2.73}$$

このように、 c は G および a の関数として表わされるが、 a の変化にはあまり影響されず、 $G \rightarrow$ 大のとき $c \rightarrow$ 大となる傾向を示す。

(3) 全焼失時間 x_i について

式 (1-3-16) において、 $x \rightarrow x_i$ のとき $A(x_i) \rightarrow G$ とすれば

$$x_i = c - [\ln(G/A(x_i)) - 1] / a \quad (1-3-39)$$

$$\text{ただし、} G/A(x_i) - 1 > 0$$

となる。したがって、式 (1-3-39) において $G/A(x_i)$ を G との関係において表示すれば、近似的に

$$G/A(x_i) \approx 1.0177 - 1.07 \times 10^{-5} G \quad (1-3-40)$$

となり、式 (1-3-39) に代入すると

$$x_i = c - [\ln(1.0177 - 1.07 \times 10^{-5} G)] / a \quad (1-3-41)$$

となる。

3.4.2 K市およびS市の火災資料による延焼モデルの実用化

(1) 延焼モデルのパラメータの推定結果

K市（人口約24万人）における詳細な火災資料（昭和37年11月～昭和38年6月）を用いて解析した結果、S市（人口約27万人）の火災資料（昭和53年3月～昭和55年4月）を用いて解析した同様の結果および佐賀関火災実験（SAと略す）について同様な結果をまとめて表 1-3-4に示す。表 1-3-4において、K市の場合にLと表記しているのは出火原因によって分類した延焼拡大の特に大きな場合（たとえば、灯油から出火してカンナ屑あるいは畳に着火した場合など）である。添字Lがないものは、それ以外の普通の場合である。

表 1-3-4 a, α, r および tan θ' の値

	$a = V_0 \alpha$	α	r	$\tan \theta'$
K	$a_K = (0.175 + 0.0245 v^{1.62}) \alpha_K$	$\alpha_K = \left(\frac{175.7}{G} \right)^{r_K}$	$r_K = 0.582 \quad e^{-0.146v}$	$\tan \theta'_K = 0.980 a_K^{1.40}$
LK	$L a_K = (0.375 + 0.0860 v^{1.27}) L \alpha_K$	$L \alpha_K = \left(\frac{136.3}{G} \right)^{r_K}$	$L r_K = 0.261 \quad e^{-0.0459v}$	$L \tan \theta'_K = 0.460 L a_K^{1.26}$
S	$a_S = (0.230 + 0.0170 v^{1.10}) \alpha_S$	$\alpha_S = \left(\frac{118.9}{G} \right)^{r_S}$	$r_S = 0.562 \quad e^{-0.134v}$	$\tan \theta'_S = 0.900 a_S^{1.37}$
SA	$a_{SA} = 0.384 \alpha_{SA}$	$\alpha_{SA} = \left(\frac{126.3}{G} \right)^{r_{SA}}$	$r_{SA} = 0.690$	$\tan \theta'_{SA} = 5.71 a_{SA}^{2.73}$

備考：左添字は、K市の出火原因別に分類した延焼しやすい場合のものを示す

採用した火災資料は、K市は全件数60件のうち20件（普通の場合11件、Lの場合 9件）、S市の場合は全件数40件のうち21件である。また、表 1-3-4においてSA（佐賀関火災実験）の α および $\tan \theta'$ を示したが、そのデータは表 1-3-3に示すもので、Gの分類数が少ないため精度は少々落ちるものと考えられるが、K市、S市と同様の傾向を示すものとして参考に求めたものである。また、 $a_{SA} = \alpha V_0$ において、 $V_0 = 0.384$ となっているのは佐賀関火災実験が風速 $v \approx 1.8$ m/sec であって、 V_0 が v の関数として表示できなかったからである。

さて、表 1-3-4の係数値は、式 (1-3-35) の a および c を a_1 および c_1 と書きかえて

$$A = \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + e^{-a_1 (x - c_1)}} - \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + e^{a_1 c_1}} \quad (1-3-42)$$

としたものに適用する。ここで、 a_1 および c_1 としたのは、これらは G の関数であり、式 (1-3-42) においては、式 (1-3-16) を修正した場合に G を $(G + n \cdot \varepsilon)$ としているために、その影響を受けるものと考え添字 1 をつけて G のみの場合の a および c と区別した。

(a) パラメータ a 、 α 、 r 、 V_0 および $\tan \theta'$ の関数関係

表 1-3-4における係数 a と G の関係 ($v = 2.5$ m/sec) を図 1-3-17 に、 r と v の関係を図 1-3-18 に、 V_0 と v の関係を図 1-3-19 に、 $\tan \theta'$ と a の関係を図 1-3-20 に示す。K市とS市を比較すると、延焼拡大の特に大きな場合（添字 L で示したもの）を除き、 a 、 r 、 V_0 および $\tan \theta'$ はかなり似ているが、必ずしも火災資料が十分でなくこの 2 都市だけから木造および防火的木造の火災が一般的にこのように延焼するとは断言できないであろう。さらに詳しく他の都市などの多くの火災資料の蓄積をする必要があると考えられるが、一応の傾向が得られたものと思われる。

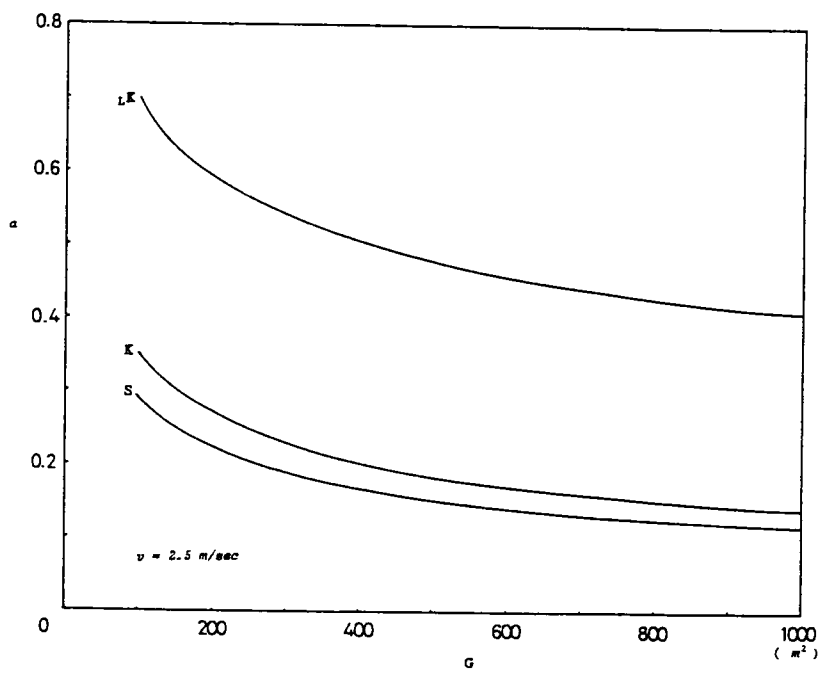


図 1-3-17 a と G の関係

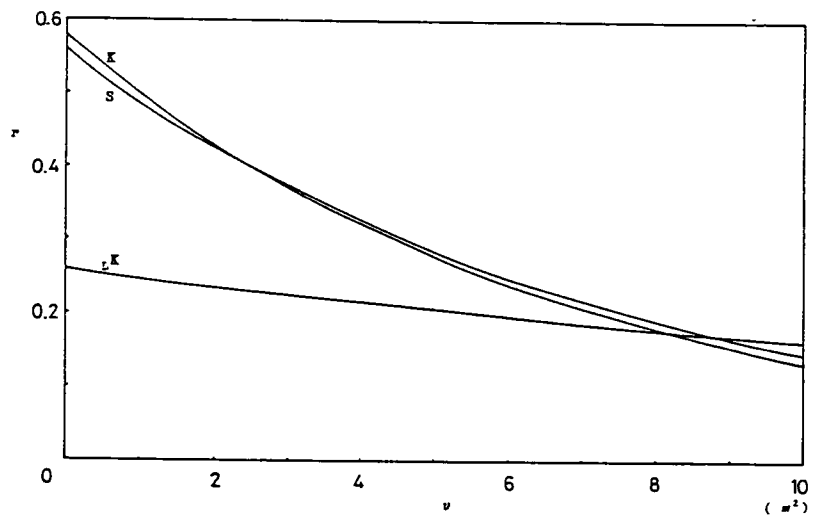


図 1-3-18 r と v の関係

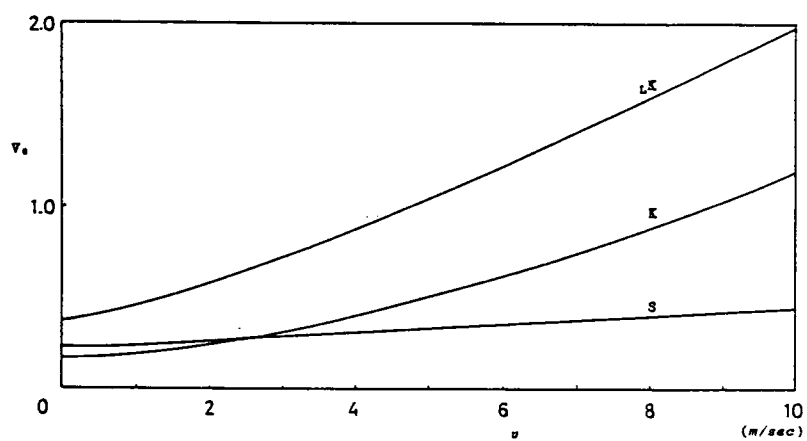


図 1-3-19 V_0 と v の関係

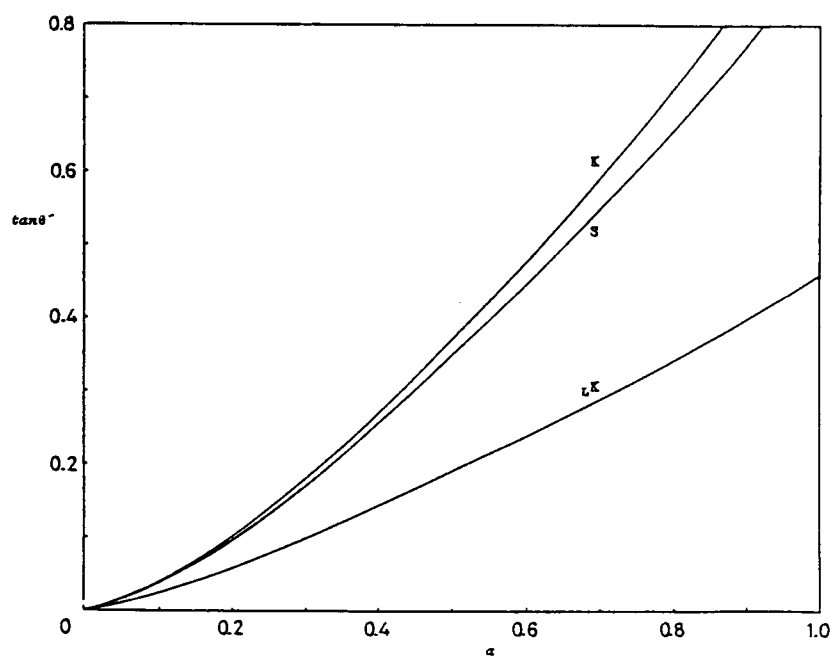


図 1-3-20 $\tan \theta'$ と α の関係

(b) 変数 v 、 G および x の適用範囲

つぎに、表 1-3-4 に示す v および G 並びに x の解析資料の範囲は

$$i) \quad 0 \leq v \leq 10 \text{ [m/sec]}, \quad 50 \leq G \leq 1500 \text{ [m}^2\text{]}, \quad x \leq 90 \text{ [min]}$$

であったが、その多くは

$$ii) \quad 0 \leq v \leq 7 \text{ [m/sec]}, \quad 100 \leq G \leq 600 \text{ [m}^2\text{]}, \quad x \leq 60 \text{ [min]}$$

に集中していた。したがって、各変数の適用範囲としては、ii) は比較的精度はよいが、少し精度を落とせば、i) を用いて差し支えないであろう。

(c) 修正係数 n

つぎに、 n と v の関係は片対数紙にプロットすれば、ほぼ直線で表わされるので

$$n = \rho \cdot e^{\zeta v} \quad (1-3-43)$$

ここに、 ρ 、 ζ : 係数、 v : 風速 (m/sec)

とおいた場合の ζ と G および ρ と G の関係を図 1-3-21 に示す。 ρ は G の 1 次式 (ζK は 2 次式)、 ζ は G の 2 次式として近似することができた。それらの関係式をまとめて表 1-3-5 に示す。

修正量 $n \varepsilon$ および $n \varepsilon / G$ の値を $v = 2.5 \text{ m/sec}$ の場合について図 1-3-22 に示す。それぞれ $G = 100 \sim 1000 \text{ m}^2$ の範囲で K の場合は約 $6 \sim 23 \text{ m}^2$ ($6 \sim 2.3\%$)、 ζK の場合は約 $5 \sim 14 \text{ m}^2$ ($5 \sim 1.4\%$)、 S の場合は約 $8 \sim 29 \text{ m}^2$ ($8 \sim 2.9\%$) となる。したがって、上式の n を式 (1-3-42) に代入することによって、任意の時刻 x に対する焼失面積 $A(x)$ は式 (1-3-16) を修正した式 (1-3-42) で求めることができる。

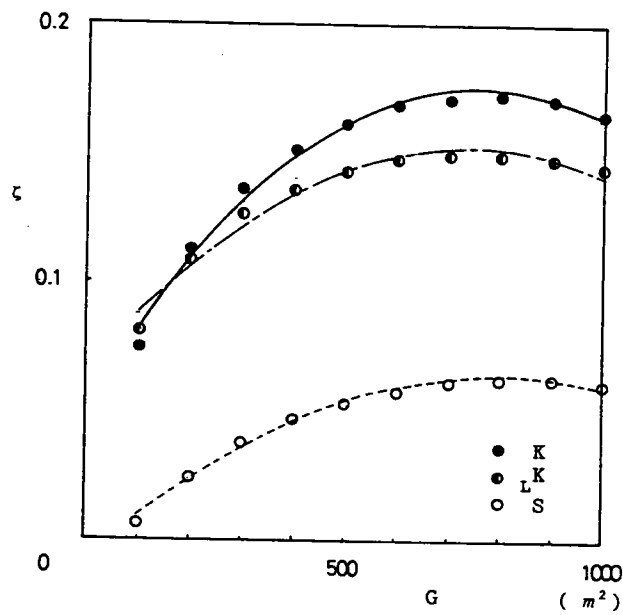
(d) 延焼抵抗について

つぎに、係数 a の低減係数 α と G の関係を佐賀関火災実験と比較するために、 $v = 1.8 \text{ m/sec}$ として図 1-3-23 に示す。これによると佐賀関火災実験の場合の低減係数 α は、 K 市および S 市よりも G が大きくなるにつれて小となり、延焼抵抗係数 R については大きくなっていることがわかる。

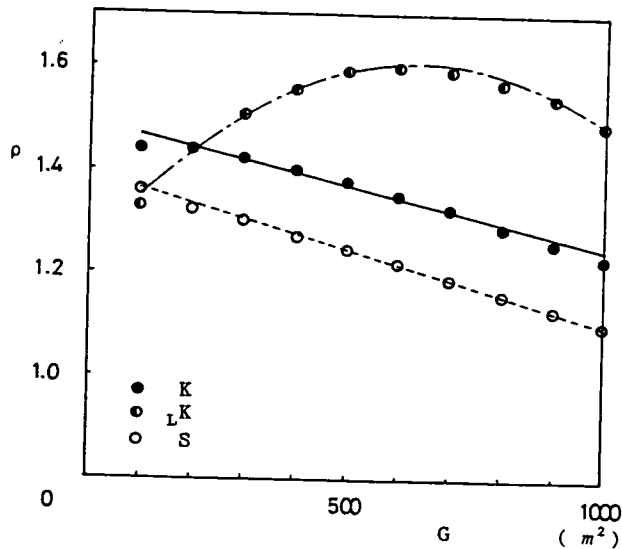
また、表 1-3-4 では建べい率 $\delta = 0.60$ 程度であり、 δ が多少変化した場合には近似的に

$$\alpha = (b / G^r) \times (\delta / 0.60) \quad (1-3-44)$$

と表示できるものと考えられる。



(a)



(b)

図 1-3-21 ζ および ρ と G の関係

表 1-3-5 ρ および ζ と G の関係

	ρ	ζ
K	$1.39-2.82 \times 10^{-4} G$	$5.16 \times 10^{-2} + 3.29 \times 10^{-4} G - 2.18 \times 10^{-7} G^2$
LK	$1.24 + 1.15 \times 10^{-3} G - 9.05 \times 10^{-7} G^2$	$6.54 \times 10^{-2} + 2.35 \times 10^{-4} G - 1.59 \times 10^{-7} G^2$
S	$1.49 - 2.42 \times 10^{-4} G$	$-6.87 \times 10^{-3} + 1.76 \times 10^{-4} G - 1.09 \times 10^{-7} G^2$

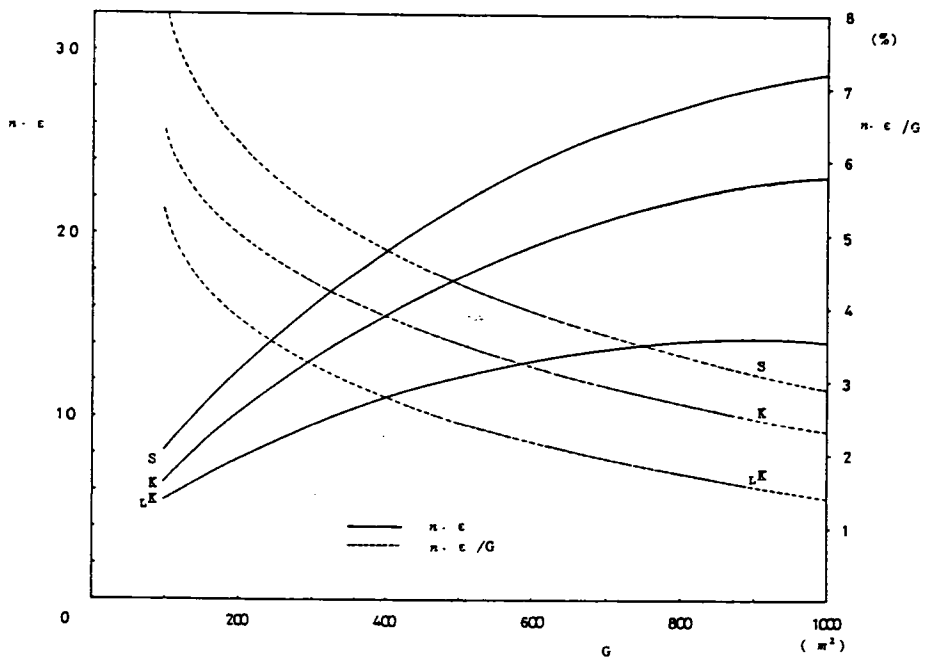


図 1-3-22 $n \cdot \epsilon$ および $n \cdot \epsilon / G$ と G の関係

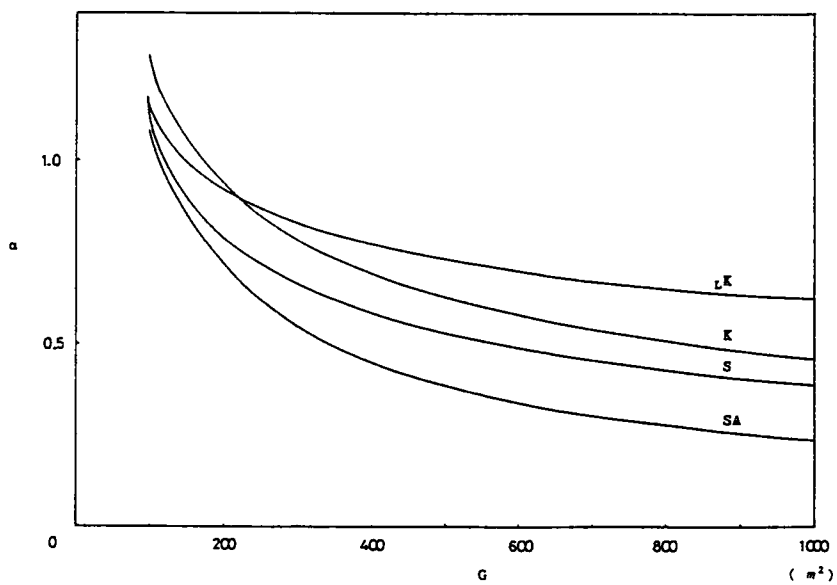


図 1-3-23 α と G の関係 ($v=1.8m/sec$)

(2) 従来の式との比較検討

(a) 全焼失時間と焼失面積の関係 (x_i 曲線)

式(1-3-42)によって求められた全焼失時間 x_i における焼失面積 $A(x_i)$ の曲線 (x_i 曲線と呼ぶ) を $v = 1.8 \text{ m/sec}$ として図1-3-24に示す。同図に大阪府の標準延焼速度式³⁶⁾ (OSと記す) についても図示した。これによると全焼失時間の小さいもの (延焼速度の大きなもの) の順に LK 、OS、SA、K、S の順である。なお、OSの風速 v は不明であるが、データの1部 (10 m^2 程度の部分) は東京大学の実大家屋実験³⁷⁾ (昭和9年8月：平均風速 $v = 1.3 \text{ m/sec}$) のものが使用されており、参考までに描き入れてある。

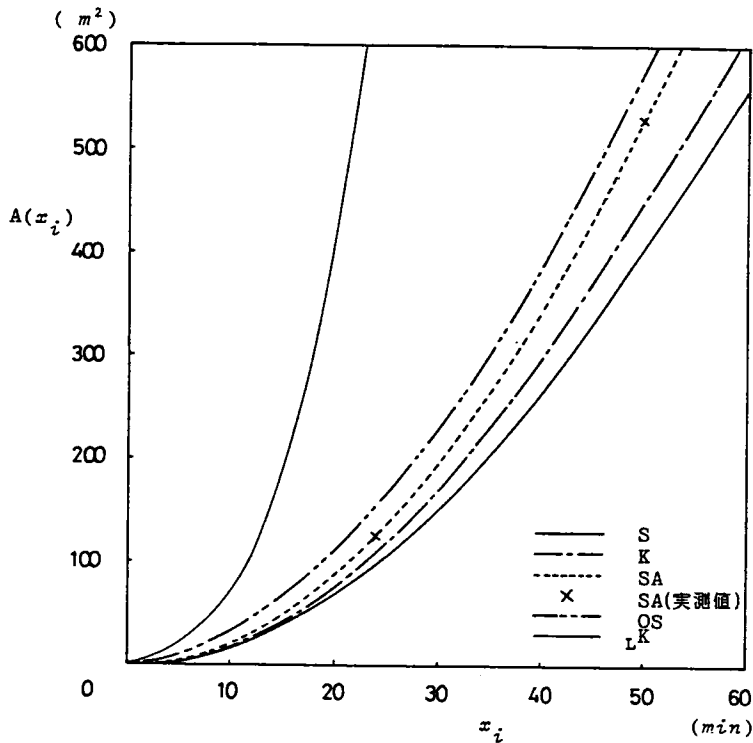


図 1-3-24 焼失面積 $A(x_i)$ と全焼失時間 x_i の関係

さて、図1-3-24の結果は、 LK は別格として、その他については建物や市街地の構成等から考えて妥当なものであると考えられる。すなわち、建物 (火災資料) の年代は、OS、SA、K、S の順に新しくなっており、それにしたがって建築材料や建物の内部が構造的に延焼しにくくなっているものと考えられる。たとえば、東大の実験では、建物内部は大きな部屋からなっていたが、最近の実際の家屋では、小さな部屋が比較的多く存在するので、その区画が延焼を遅らせる要因の1つとなっていると考えられる。

つぎに、K市およびS市の x_i 曲線を v をパラメータとして図1-3-25および図1-3-26に

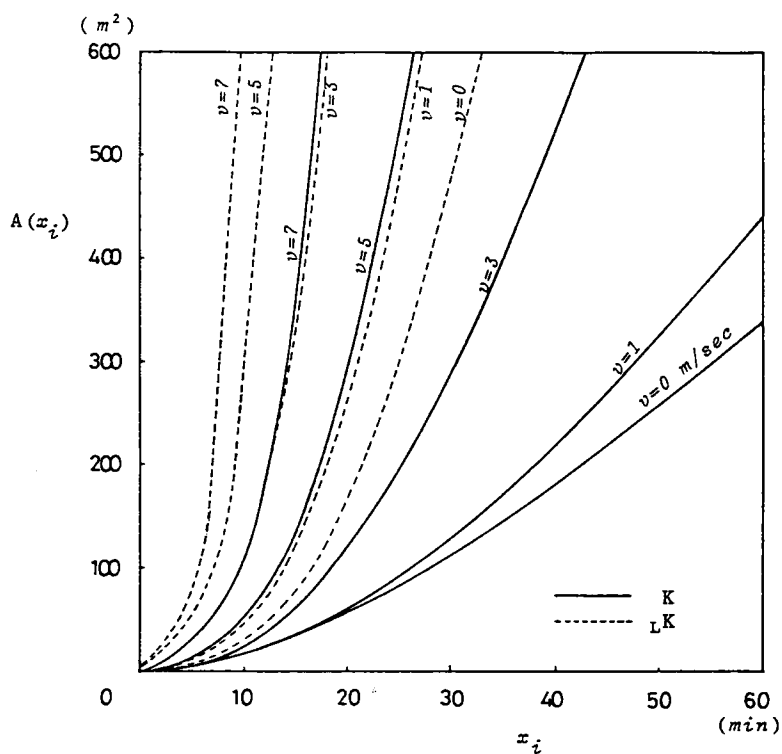


図 1-3-25 K市における焼失面積 $A(x_i)$ と全焼失時間 x_i の関係

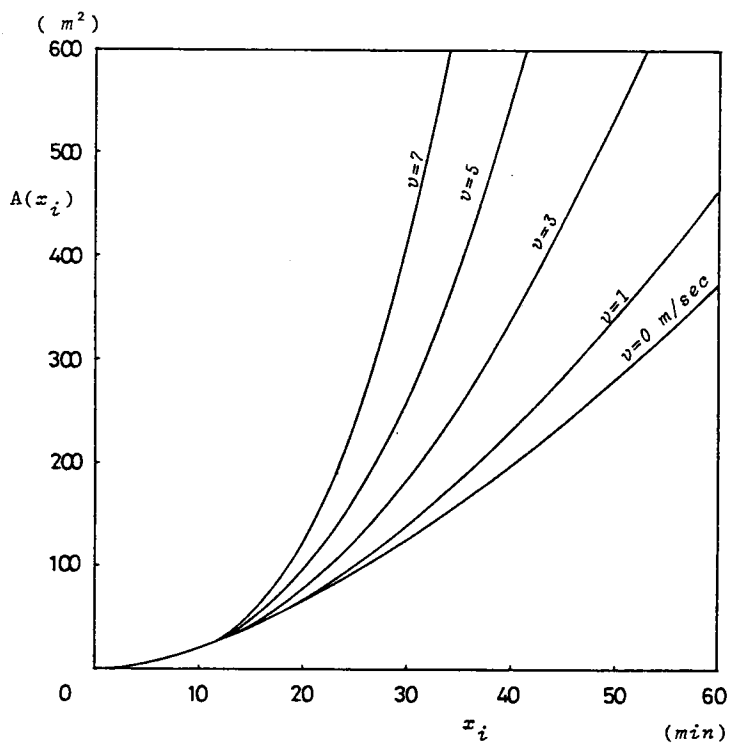


図 1-3-26 S市における焼失面積 $A(x_i)$ と全焼失時間 x_i の関係

示す。 x_i は建築面積 G の建物全体に火が燃え広がる時間を表わしているから、図1-3-24～図1-3-26は、任意の時刻 x に対する焼失面積 $A(x)$ を表わすのではない。この意味を明確にするために、 K 市の $v=2.5\text{m/sec}$ 、 $G=100 \sim 600\text{m}^2$ の延焼モデル式（ロジスティック曲線：実線）と x_i 曲線（点線）を図1-3-27に示す。

（b） 保野の式との比較

図1-3-27には保野の式 A_{Y1} （普通建物）、 A_{Y2} （大規模建物と普通建物の混在比 1：9）および A_{Y3} （大規模建物と普通建物の混在比 2：8）を描き入れてある。保野の式の適用範囲 $x \leq 15\text{min}$ において A_{Y3} がかなりよく一致しているようである。 A_{Y1} および A_{Y2} も延焼モデル式をはさむような曲線となっており、変曲点までの部分の傾向としては比較的よく合っているようである。このように、従来の式が延焼モデル式に相当する部分は変曲点付近までであり、つぎつぎと隣棟に燃えていく場合は、 G を漸次大きくしていく場合のロジスティック曲線の変曲点を連ねたもの、あるいは変曲点までの傾向を延長したものと考えればよいものと思われる。しかし、どのような火災でも必ず焼け止まりが存在するから、従来の式では延焼モデル式の変曲点を越えた部分（図1-3-27の斜線部分）において実際の火災現象と差が生じ、過大な焼失面積を算出するような結果を与える。

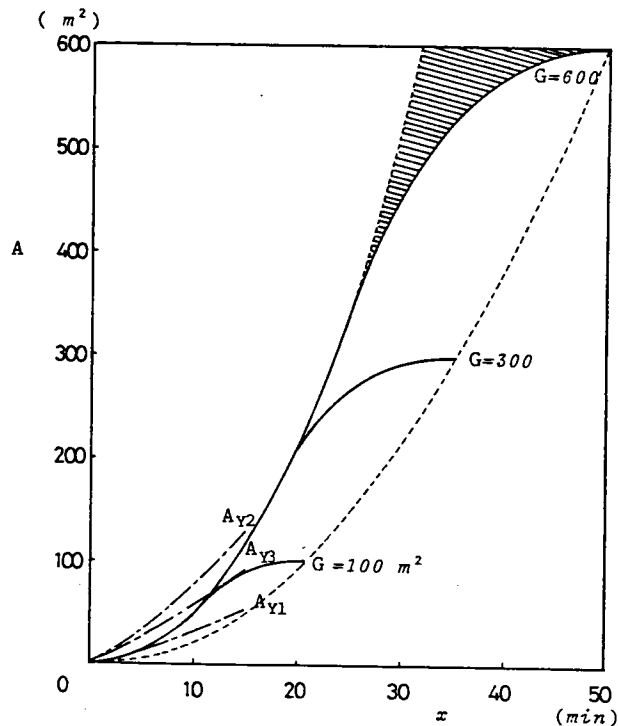


図 1-3-27 K 市の延焼速度式（ロジスティック曲線）および保野の式

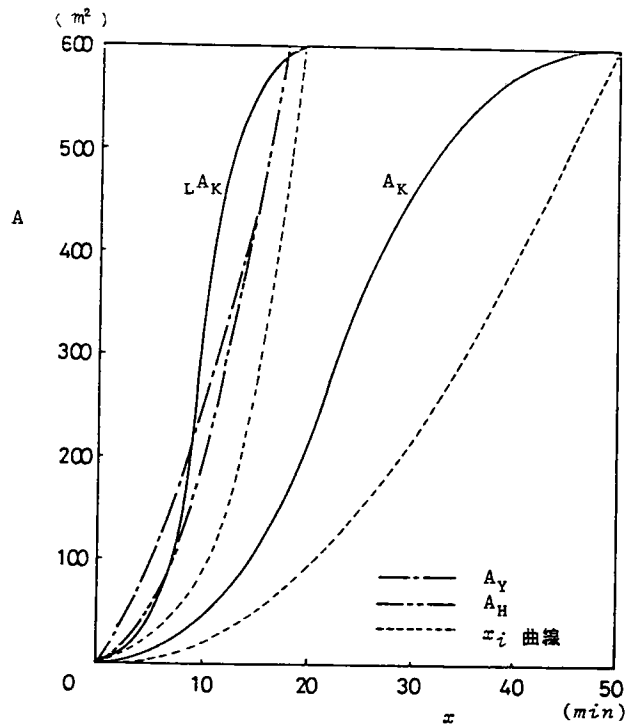


図 1-3-28 各種の延焼速度式の比較

(c) 堀内の式との比較

図1-3-28にK市の $v = 2.5\text{m/sec}$ 、 $G = 600\text{ m}^2$ の場合の A_K 、 $L A_K$ を示す。この図には堀内の式 A_H （防火的木造と木造の混在比3：1、平均階数1、建ぺい率0.6）、保野の式 A_Y （大規模建物）を示している。 A_H 、 $L A_K$ 、 A_Y がよく接近しているが、これらは、かなり延焼しやすい場合を表わすものである。これに対して、 A_K は普通の場合であるから、 A_H と比べると延焼速度はかなり小さい。このことは、堀内の式の仮定（正方形の建物が均一に並んだ街区を想定している）に対して、実際の建物の配置が等間隔でないこと、最近の建物が以前と異なり燃えにくくなっていること、あるいは隣棟間隔および周辺の延焼を阻止する構造物などの影響が複雑にからみあっていることによるものと考えられる。したがって、それらの影響を考慮したものとして

$$A_J = \frac{1}{\beta_J} \times A_H \quad (1-3-45)$$

ここに、 A_J ：J市（例えば、K市またはS市）の延焼モデル式

A_H ：堀内の式、 β_J ：係数

における β_J を考えてみる。式（1-3-45）は変曲点cまでに適用するものであるが、この

係数 $\beta_J = A_H / A_J$ を変曲点 ($x = c$) の関数として

$$\beta_J = \xi + \eta c \quad (1-3-46)$$

と表わし、各風速 (0, 1, 2, ..., 10 m/sec) で整理し、K市の場合について、図1-3-29に示す。これを関数の形で表わすと

$$\beta_K = 3.36 + (0.105 - 2.95 \times 10^{-2} v - 2.24 \times 10^{-3} v^2) c \quad (1-3-47)$$

ただし、 $0 \leq v \leq 10$ m/sec、 $5 \leq c \leq 36$ min

となる。同様にS市の場合について、図1-3-30に示す。これを関数の形で表わすと

$$\begin{aligned} \beta_S = & 2.86 + 0.217 v + 5.66 \times 10^{-2} v^2 \\ & + (8.09 \times 10^{-2} - 8.92 \times 10^{-3} v - 5.66 \times 10^{-2} v^2) c \end{aligned} \quad (1-3-48)$$

ただし、 $0 \leq v \leq 10$ m/sec、 $4 \leq c \leq 34$ min

となったが、K市とS市の傾向がやや異なっている。

式 (1-3-47) において、火災資料より精度をよくする場合を考えて、 $v = 0 \sim 7$ m/sec、 $G = 100 \sim 600 \text{ m}^2$ (各々 G に対して、K市の $c = 5 \sim 36$ min、S市の $c = 4 \sim 34$ minに相当) で、 $\beta_K \approx 1.3 \sim 6.9$ 、式 (1-3-48) では、 $\beta_S \approx 3.6 \sim 5.7$ となる。このことは、 A_H が、かなり大きめの値となることを示しており、これらの延焼速度式を使って消防計画を策定する場合に、消火時の所要ポンプ自動車台数および消防水利に大きく影響を与えるものと考えられ、今後とも十分な研究をする必要がある。

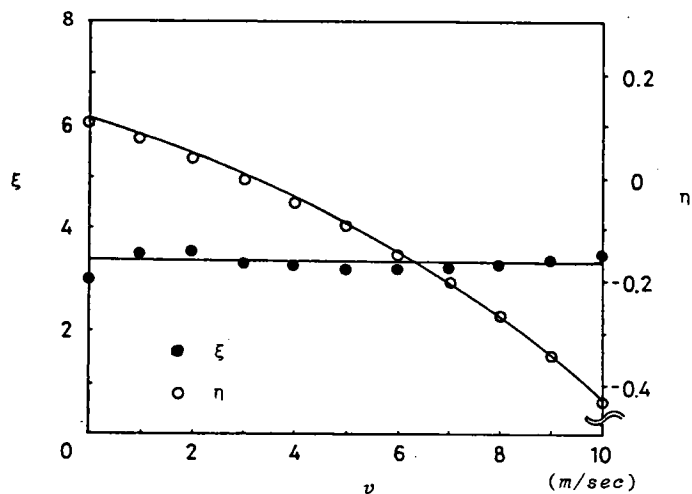


図 1-3-29 K市のξおよびηとvの関係

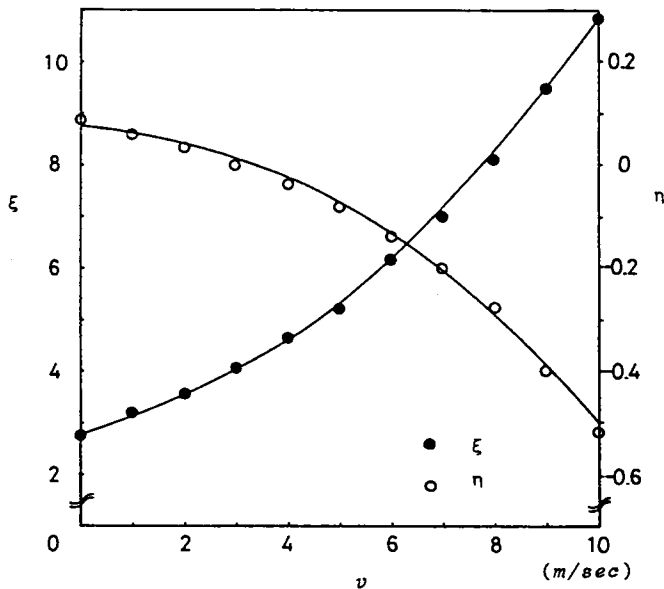


図 1-3-30 S市の ξ および η と v の関係

3. 5 結言

以上の結果をまとめると主につぎの点が指摘される。

(1) 従来の大部分の延焼モデルは大火のデータを基にしており、したがって出火後約1時間もしくはそれ以上の延焼状況（無限の可燃物が存在する場合）に重点が置かれているので、比較的小規模な通常の火災の延焼状況については必ずしもうまく説明できない。そこで、1棟または数棟が延焼する火災（有限の可燃物がある場合）に対して新しい延焼モデル式としてロジスティック曲線〔式(1-3-42)〕を採用すると比較的うまく説明することができた。

(2) ロジスティック曲線の係数を決定する方法として、① 対数線形最小2乗法、② 非線形最小2乗法、③ V法および④ 定差図法を検討したところ、厳密には非線形最小2乗法を用いるべきであるが、定差図法も近似解法として有用であることがわかった。

(3) 他の棟へ延焼拡大する場合には建物の構造や隣棟間隔、建物周辺の工作物および樹木などが延焼に対して抵抗となると考えるが、それを考慮したものとして、延焼抵抗係数 $R = G^r$ （ r ：定数）で表わした。

(4) 係数 a の低減係数 α についてみると、 $\alpha = b/G^r$ （ b ：定数）と近似的に表示することができ、基準建物の場合には $\alpha = 1$ となり、 $G \rightarrow$ 大、 $\alpha \rightarrow$ 小となるものであり、各都

市においては、建物および周辺の状況により異なるものと考えられる。

(5) 本章においてロジスティック曲線を用いて表わした延焼モデル式は、火災の出火から鎮圧までの延焼状況をかなりよく表わしており、従来の式はこの延焼モデル式（ロジスティック曲線）の変曲点まで、あるいは変曲点を連ねた線と同等のものであることがわかった。

(6) K市およびS市における延焼モデル式（ロジスティック曲線）の係数 a および c を検討することによって、これらは風速および G の関数として表わされることを明らかにした。

(7) 堀内の式 A_H と本モデルの A_K および A_S の比較において、その倍率 $\beta_K = A_H / A_K$ は式(1-3-46)で表わされ、 $v = 0 \sim 7$ m/sec、 $G = 100 \sim 600$ m^2 で、 $\beta_K \approx 1.3 \sim 6.9$ となり、 $\beta_S = A_H / A_S$ は式(1-3-47)で表わされ、 $\beta_S \approx 3.6 \sim 5.7$ となることがわかった。

第4章 都市火災の延焼阻止効果に関する研究

4.1 緒言

前章においては、火災の延焼モデルを構築した。すなわち、1棟あるいは数棟が延焼して焼止まる場合の火災の焼失面積は、出火からの経過時間との関係において、ロジスティック曲線で近似されることを示した。この章では、前章の延焼モデルを用いて、出火からどの時点でどの程度の放水をすれば延焼阻止の効果が得られるかを検討する。

従来の消火に関する研究においては、消火水量の定量的な検討のうち時間的な要素を含んだ放水量による延焼阻止効果に関する検討はあまり行なわれていないようである。以下に示す従来の研究は、筆者の意図する放水による延焼阻止効果の分析に使用することは困難であるが、その考え方は参考に値するものと思われるので概説する。

4.2 従来の研究

39),40),41),42)

4.2.1 碓井の研究

碓井は、燃焼木材に対する注水量の実験式を提案し、実際の火災の使用水量と比較しているが、この研究は、いわゆる消火注水の実状を分析したもので、その効果分析にまで及んでいないようである。

43)

4.2.2 菱田の研究

火災の保険料率算定の基礎として供されてきたもので、注水量と鎮圧時間を図式解法によって求める方法である。本法では、消火に必要な注水量は浜田の延焼速度式より延焼拡大する火面の形を卵形とした場合の火面1mあたりに1tonの注水が必要として算出される。また、火面周長は、風速、建物階数、建ベイ率、火線の割合によって変化するように算出される。

44)

4.2.3 堀内の研究

堀内は、消火に際し筒先本数の多少が重大な役割を果たすと考えられるとし、所要注水筒先本数(N)および所要ポンプ車台数(P_H)を次式で与えている。

$$N = S / 10 \quad (1-4-1)$$

$$P_H = N / 2 = S / 20 \quad (1-4-2)$$

ここに、S：火面周長（m）

また、水利点の所要配置密度W（個／ km^2 ）は

$$W = (1,000,000 \times S / 20) / 210(2k'' + k' + k + 280) \quad (1-4-3)$$

ここに、k：風下側延焼距離（m）

k'：風上側延焼距離（m）

k''：風横側延焼距離（m）

とし、これ以上の配置密度でなければ、ポンプ車の能力を十分に発揮できないとしている。
なお、ノズル1本当たりの放水量は $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$ と定めている。

45) 4.2.4 保野の研究

保野は、火面を1：2となる矩形とし、実際の建物に凹凸部分や死角があることを考慮して、火面周長を矩形周長のさらに50%増しとして、ポンプ車1台につき20mを割り当てて、放水量 Q_Y （ m^3/min ）とポンプ車台数 P_Y （台）を

$$Q_Y = 0.382 \sqrt{A} \quad (1-4-4)$$

$$P_Y = 0.318 \sqrt{A} \quad (1-4-5)$$

と表わしている。これらの式は、ある焼失面積に対して有効な消防活動が可能となる値を算出する。ただし、ポンプ車1台の放水量をノズル2本と考えて $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ としている。

46), 47) 4.2.5 高橋の研究

高橋は、木材および木炭のクリブによるモデル火災に関する実験ならびに理論的考察によって、種々の消火諸現象の定量化を行なっている。1例を示すと、消火時間 t_e は、比較的注水率の大きい範囲で

$$t_e \sim Mc \mu p^{-1} \quad (1-4-6)$$

ここに、Mc：消火開始時間時の平均木炭量（g）

μ ：木炭単位当たりの必要水量（ $\text{g H}_2\text{O} / \text{g}_{\text{char}}$ ）

p：注水速度（ g/min ）

となることを示している。これらの結果を実際の火災へ適用する方法については、今後の課題とされており、以後の研究の展開が期待される。

48)

なお、以上の他に海外における最近のP. Fucksらの研究によると、消火水量の決定のための数学モデルと実験との比較を行っており、計算による消火水量は実験のものより大となることや、水に $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ や KHCO_3 などを溶かした場合には、水だけ注水した場合より量が少なくてよいこともある等が報告されている。

高橋やP. Fucksらの研究を実験室レベルのミクロ的な研究とすれば、次節より説明する筆者の方法は火災統計というマクロなデータを分析するもので、これを実際の火災に対する消防計画に資することを目的とするものである。

4.3 延焼阻止効果の数学モデル

出火からある時点 $x = x_0$ において、放水を開始するものとする。この時点までは、式(1-3-35)に示す延焼モデルを適用するものとして、 $x = x_0$ のときの焼失面積を、 $A = A_0$ とする。放水開始後の延焼状態を考えてみると、放水開始後の数分間は、放水の効果があり表われず放水開始前の延焼状態が続き、徐々に放水効果が現われるものと考えられる。模式的に示すと図1-4-1の点線のように、自然に延焼する場合の実線から徐々に離れていくものと考えられる。

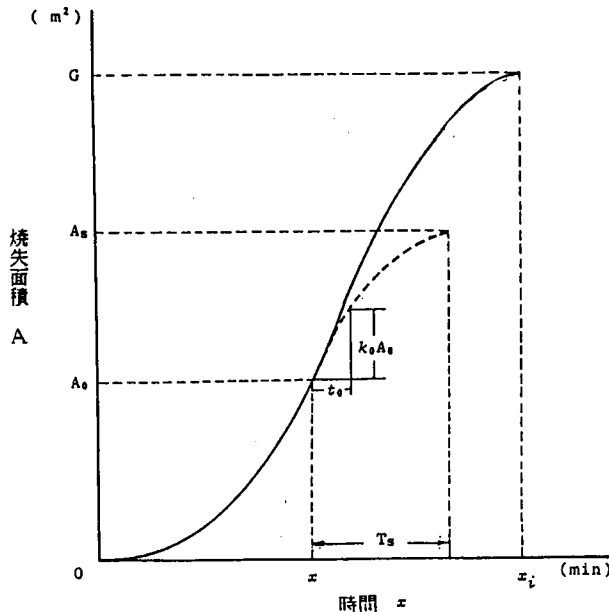


図 1-4-1 焼失面積と時間の関係の模式図

さて、放水開始からある時間 t_0 (min) 経過したときの焼失面積は、 A_0 から延焼増加した割合を k_0 とすると

$$A = (1 + k_0) A_0$$

であり、このときに要する放水量 W_0 (m) は、単位面積当たりの所要水量 q (m/m²) を掛けたもの、すなわち

$$W_0 = q (1 + k_0) A_0 \quad (1-4-7)$$

と表わすことができる。また

$$\left. \frac{dA}{dx} \right|_{x=x_0} = m \cdot \frac{k_0 A_0}{t_0} \quad (1-4-8)$$

である。ここで、 $dA/dx|_{x=x_0} \doteq k_0 A_0 / t_0$ と表わすこともできるが、両辺を等しくさせるための修正係数 m を導入している。

つぎに、1分間当たりの放水量 Q (m³/min) は、式 (1-4-7) および式 (1-4-8) より

$$Q = \frac{W_0}{t_0} = \frac{q}{m} \left(1 + \frac{1}{k_0}\right) \left. \frac{dA}{dx} \right|_{x=x_0} \quad (1-4-9)$$

となる。ここで、 $q/m = q_0 t_0$ とおき (q_0 は単位時間当たりの単位面積当たり所要水量 [m³/m²・min] で、所要消火係数と呼ぶ)、式 (1-4-9) に式 (1-3-35) を代入すると

$$Q = q_0 t_0 \left(1 + \frac{1}{k_0}\right) \frac{a \cdot e^{-a(x_0 - c)} \cdot (G + n\varepsilon)}{\{1 + e^{-a(x_0 - c)}\}^2} \quad (1-4-10)$$

となる。右辺の $(1 + 1/k_0)$ 以外の項を定数 B 、すなわち

$$B = q_0 \cdot t_0 \cdot a \cdot e^{-a(x_0 - c)} \cdot (G + n\varepsilon) / \{1 + e^{-a(x_0 - c)}\}^2$$

とし、 Q と k_0 の関係を図示すれば、図 1-4-2 のようである。この図より、 $k_0 \rightarrow 0$ のとき $Q \rightarrow \infty$ となり、 $k_0 \rightarrow \infty$ のとき $Q \rightarrow B$ となる。ただし、実際には x_0 より $t_0(\text{min})$ の間に $k_0 = \infty$ とはなり得ず、自然に延焼増加する割合以下が k_0 の取り得る値である。すなわち、自然に延焼していく場合の $x = x_0 + t_0$ の焼失面積を A_{t_0} とすれば

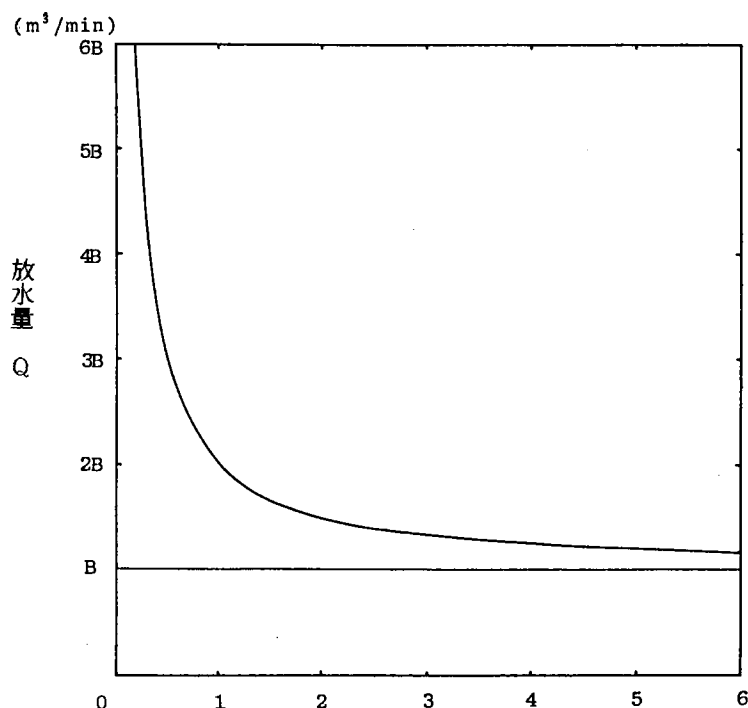


図 1-4-2 Qと k_0 の関係

$$k_0 \leq \frac{A_{t_0} - A_0}{A_0}$$

であり、この k_0 の上限値を式(1-4-10)に代入すれば

$$Q_B = B \left(1 + \frac{A_0}{A_{t_0} - A_0} \right) \quad (1-4-11)$$

となり、 Q_B 程度の放水量では、消火に全く効果をなさないことになる。

なお、消火放水のされている火災データより、自然に延焼する場合に式(1-3-35)の係数 a 、 c および G を式(1-4-10)に最小2乗法を適用して求めることもできる。ただし、式(1-4-10)はパラメータ a 、 c および G について非線形の関数であり、非線形最小2乗法によって計算する場合には、前章でも述べたように、初期値の与え方によっては、解が求まらないこと(繰り返し計算により収束しないこと)もある。

さて、式(1-4-9)を k_0 について解く($q/m = q_0$ t_0 とおく)と

$$k_o = \frac{q_o t_o \left. \frac{dA}{dx} \right|_{x=x_o}}{Q - q_o t_o \left. \frac{dA}{dx} \right|_{x=x_o}} \quad (1-4-12)$$

となる。放水開始から t_o (min) 後の焼失面積を $A(t_o)$ とすれば

$$A(t_o) = (1 + k_o) A_o \quad (1-4-13)$$

である。つぎに、放水開始から任意の時刻 t (離散変数、1、2、3・・・[min]) の焼失面積 $A(t)$ を算出する方法について述べる。 $t=1$ の場合は、式 (1-3-35)、式 (1-4-12) および式 (1-4-13) から $A(1)$ を求めることができる。 $t=2、3、・・・$ の焼失面積 $A(2)、A(3)、・・・$ は、放水開始後の各時刻においても式 (1-4-12) が成立するものとし、時間間隔 $t_o = 1$ として、これを差分の形で

$$k_o(t) = \frac{q_o (A(t-1) - A(t-2))}{Q(t-\frac{1}{2}) - q_o (A(t-1) - A(t-2))} \quad (1-4-14)$$

ただし、 $k_o(t) \geq 0$

$$\begin{aligned} A(t) &= \{1 + k_o(t)\} A(t-1) \\ &= \{1 + k_o(t)\} \{1 + k_o(t-1)\} \cdots \\ &\quad \cdots \{1 + k_o(1)\} A(0) \end{aligned} \quad (1-4-15)$$

と表わすことができる。ここで、 $Q(t)$ と $Q(t-1)$ は線形に変形するものと考えて、その平均、すなわち $Q(t-\frac{1}{2})$ が延焼阻止の効果に貢献するものと考えている。したがって、放水量 $Q(t)$ の状況に応じた放水開始後の時刻 t の焼失面積 $A(t)$ は式 (1-4-15) に式 (1-4-14) を代入して求めることができる。

4. 4 モデルによる延焼阻止効果の検討

火災資料は、前章と同じK市における昭和37年11月から昭和38年 6月までの60件のうち、延焼状況および消火活動の詳しく調査されている19件を採用して分析を行なった。火災延焼および消火条件に関する主なものの統計値(最大値、最小値、平均値および標準偏差)を表 1-4-1に示す。

消火活動を行なう前の延焼モデル式は、前章により

表 1-4-1 K市における主な火災延焼項目の統計値

項目	焼失面積	風速	放水開始 時間	鎮圧時間	1 m ² 当たりの 放水量
統計値	A _s (m ²)	v (m/sec)	x ₀ (min)	T _s (min)	q (m ³ /m ²)
最大値	1563.0	7.0	12.0	35.0	0.2825
最小値	74.0	0.3	3.0	5.0	0.0078
平均値	325.8	2.7	7.2	13.4	0.0659
標準偏差	419.5	2.0	2.7	8.2	0.0825

$$A = \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + e^{-a_1(x - c_1)}} - \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + e^{a_1 c_1}} \quad (1-4-16)$$

ここに、G：建物群の建築面積（m²），v：風速（m/sec）

$$n = (1.39 - 2.82 \times 10^{-4} G)$$

$$\times e^{(5.16 \times 10^{-2} + 3.29 \times 10^{-4} G - 2.18 \times 10^{-7} G) v}$$

$$\varepsilon = \frac{G}{1 + e^{a c}}$$

$$a = (0.175 + 0.0245 v^{1.62}) \left(\frac{175}{G} \right)^{0.582} e^{-0.146v} \quad (1-4-17)$$

$$a_1 = (0.175 + 0.0245 v^{1.62}) \left(\frac{175}{G + \varepsilon} \right)^{0.582} e^{-0.146v}$$

$$c = [\ln(0.980 a^{1.40} G)] / a$$

$$c_1 = [\ln \{ 0.980 a_1^{1.40} (G + n \varepsilon) \}] / a_1$$

と表わされている。

4.4.1 延焼モデルの諸要素について

(1) 所要消火水量係数 q_o

式 (1-5-10) における Q 、 t_o 、 k_o 、 a 、 c 、 x_o 、 G 、 n 、 ε は火災資料より得られるので、これらの値を式 (1-4-10) に代入すれば、 q_o が求まる。この所要消火水量係数 q と放水開始時の焼失面積 A_o の関係を図示すれば、図 1-4-3 のようになる。これらの点より非線形最小 2 乗法を用いて

$$q_o = 0.423 A_o^{-0.898}$$

が得られた。このように、 q_o は A_o の増大とともに減少する傾向がある。

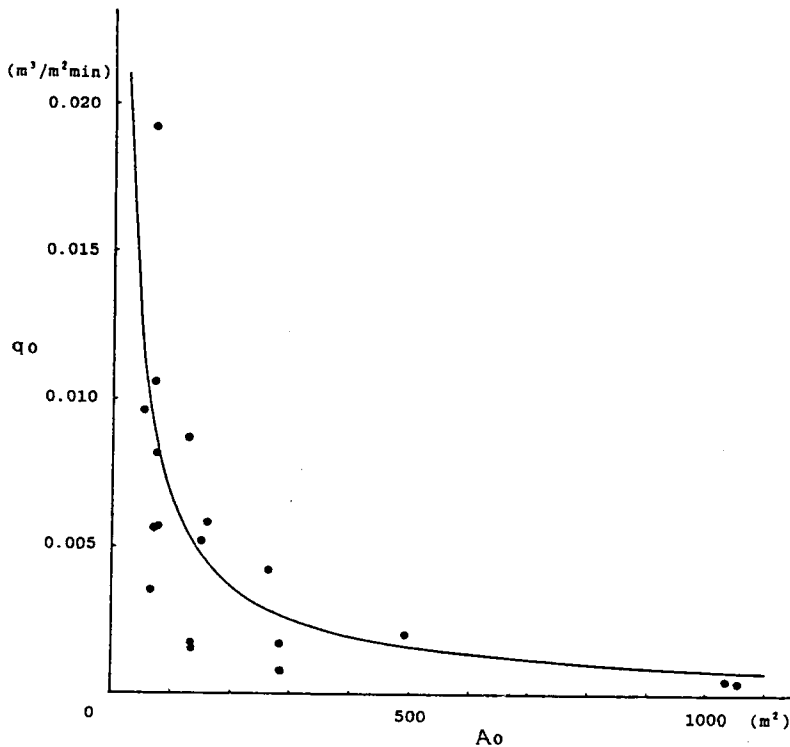


図 1-4-3 q_o と A_o の関係

(2) Q_B

式 (1-4-11) の Q_B と A_o の関係を図 1-4-4 に、 Q_B と x_o の関係を図 1-4-5 に示す。これらの関係は、式 (1-4-10) で $G=300 \text{ m}^2$ 、 $v=3.0 \text{ m/sec}$ 、 $t_o=1 \text{ min}$ および式 (1-4-17) を代入したものである。なお、 x_o と A_o は従属の関係にあり、 x_o を式 (1-4-16) に代入すれば A_o が求まる。また、 a 、 c 、 n および ε は式 (1-2-17) により求まる。ここで、 $G=300 \text{ m}^2$ 、 $v=3.0 \text{ m/sec}$ としたのは、表 1-4-1 の焼失面積および風速を参照

設定したものである。また、消防力の基準によれば、消火開始時間は、年間平均風速 4 m/sec 以下の場合には 8 min とされている。以下では、これらの数値を標準的なもの（モデル火災）と考える。この条件のうち、 $G = 300 \text{ m}^2$ とは、建ぺい率を 60% とした場合、敷地 500 m^2 の範囲内に $3 \sim 5$ 棟（建築面積の合計が 300 m^2 ）の木造建物が存在する区域を想定していることになる。また、この区域の周囲を道路等の空間によって他の区域と分離されているものとする。たとえば、延焼限界隣棟間隔を堀内の式（1-3-6）によるものとするれば、 $\Delta_1 = 2.5 + v/4 \approx 3.3 \text{ (m)}$ 以上の道路等の空間に囲まれている区域である。

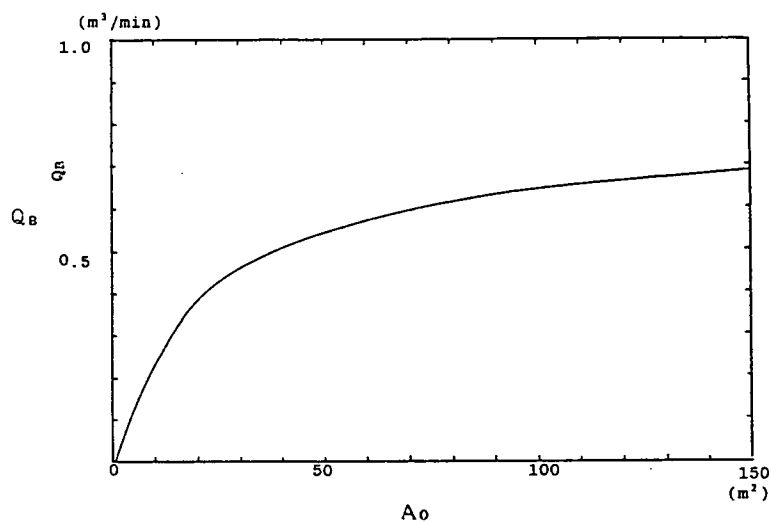


図 1-4-4 Q_B と A_o の関係

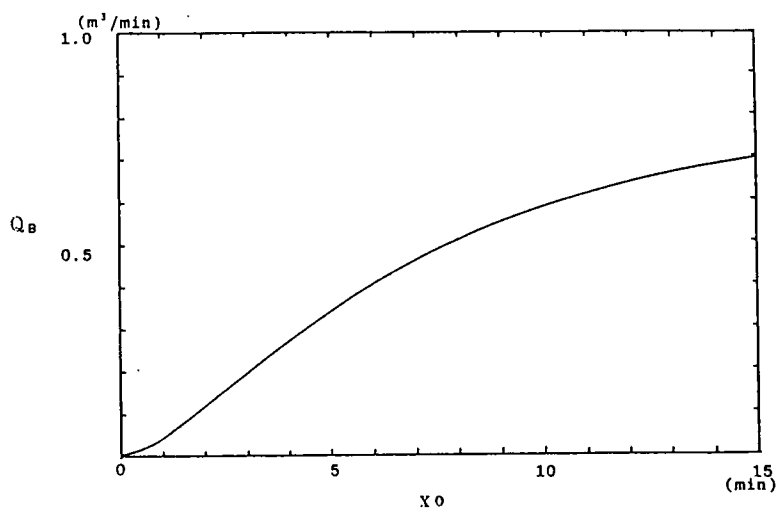


図 1-4-5 Q_B と x_o の関係

(3) 放水量のパターン

1分間当たりの放水量 Q (m^3/min)と時間 t (min)の関係は、火災現場に集まってくるポンプ車台数、水利能力によって決まり、近似的に

$$Q = K_0 t^{n_0} \quad (1-4-19)$$

と表わされる。係数 K_0 と n_0 の統計値を表1

表 1-4-2 式 (1-4-19) における
係数 K_0 と n_0 の値

項目 統計値	K_0	n_0
最大値	1.983	0.702
最小値	0.229	0.105
平均値	0.845	0.437
標準偏差	0.394	0.179

-4-2に示す。これらは、各々の火災において鎮圧までの1分間ごとの放水量のデータに対し、式 (1-4-19) に非線形最小2乗法を適用して求めた値の平均値である。いま、 K_0 、 n_0 の平均値 (\bar{K}_0 , \bar{n}_0) に各々の標準偏差 (σ_{K_0} , σ_{n_0}) を減じた場合、平均値の場合、平均値に標準偏差を加えた場合の3つの放水量パターンを考えてみる。

$$\begin{aligned} Q_1 &= (\bar{K}_0 - \sigma_{K_0}) t^{(\bar{n}_0 - \sigma_{n_0})} \\ &= 0.451 t^{0.258} \end{aligned} \quad (1-4-20)$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= \bar{K}_0 t^{\bar{n}_0} \\ &= 0.845 t^{0.437} \end{aligned} \quad (1-4-21)$$

$$\begin{aligned} Q_3 &= (\bar{K}_0 + \sigma_{K_0}) t^{(\bar{n}_0 + \sigma_{n_0})} \\ &= 1.239 t^{0.616} \end{aligned} \quad (1-4-22)$$

消防ポンプ自動車1台当たり $1 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ の放水が可能であるとすれば、式 (1-4-20) ～式 (1-4-22) において、 $t = 20 \sim 30 \text{ min}$ に対する値より、 Q_1 は約1台、 Q_2 は約3台、 Q_3 は約7台分の放水量に相当することがわかる。図 1-4-6は、式 (1-4-20) ～式 (1-4-22) の曲線を両対数グラフに示したものである。

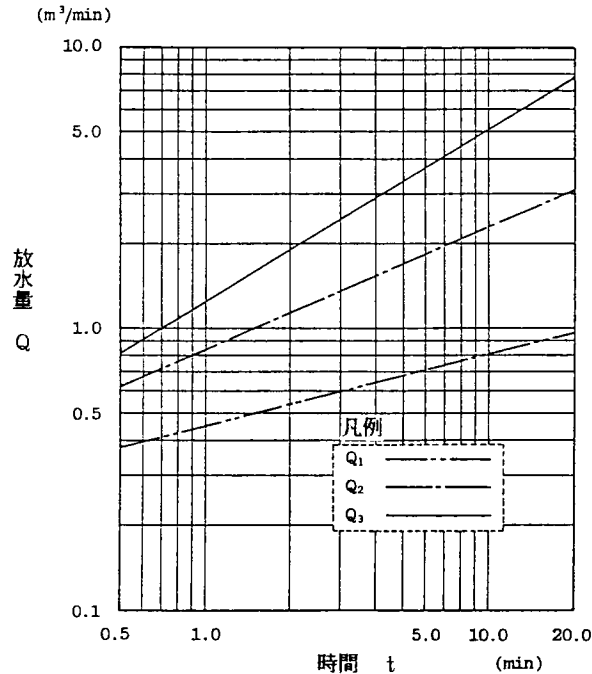


図 1-4-6 放水量 Q と時間 t の関係

4.4.2 延焼阻止効果について

モデル火災〔式(1-4-16)で $G=300\text{ m}^2$ 、 $v=3.0\text{m/sec}$ としたもの〕の場合に、消火開始時間 x_0 を4、8、12、および16minとして、各々の時刻より式(1-4-20)～式(1-4-22)の放水量で消火を行なったとすると、図1-4-7のような延焼阻止の状況を示す曲線が得られる。これは、式(1-4-14)および式(1-4-15)より計算したものである。図に示されている例では、 Q_1 の放水量(ポンプ車1台分に相当)については、 $x_0=4\text{min}$ の場合のみ有効となり、それ以外の放水開始時間の場合には、この程度の放水量では効果が期待できなく、消火活動を行なわない場合の破線と同等となる。 Q_2 および Q_3 では、いずれもどの放水開始時間の場合にも放水による延焼阻止の効果が現われていることがわかる。

つぎに、消火放水開始時間 x_0 と焼失面積 A の関係を図1-4-8に示す。これによると、 Q_1 の放水で効果が期待できる x_0 は約5min以下の場合であることがわかる。また、標準の放水開始時間 $x_0=8\text{min}$ の場合には、 Q_1 では全く不足し、焼失面積 A は 300 m^2 、全焼)となり、 Q_2 の放水では $A\approx 60\text{ m}^2$ 、 Q_3 では $A\approx 50\text{ m}^2$ に鎮圧できることがわかる。さらに、 Q_2 と Q_3 の曲線を比較すると、 $x_0=10\sim 15\text{min}$ の範囲でほぼ平行となる直線

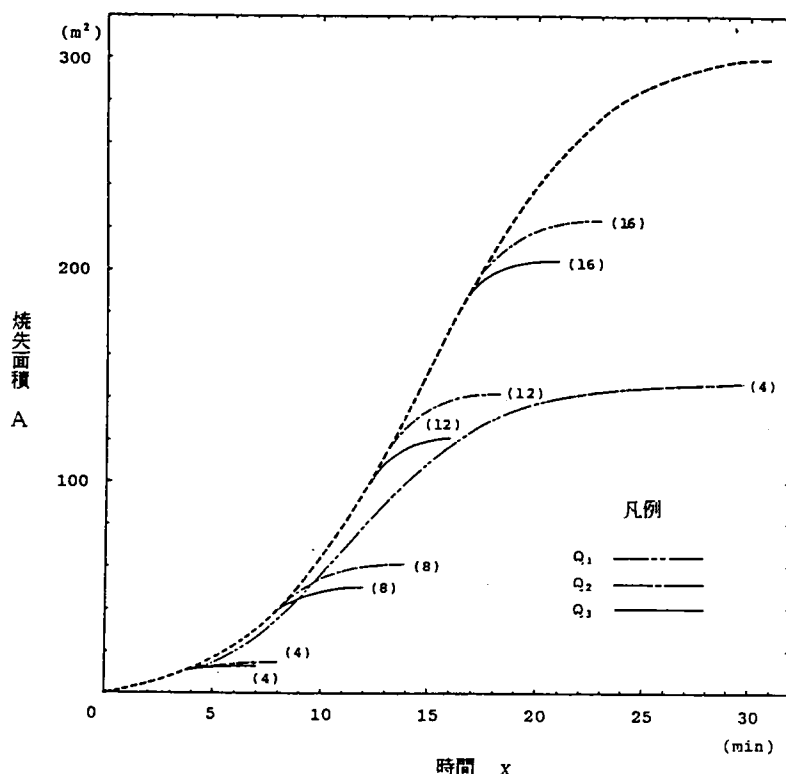


図 1-4-7 焼失面積Aと時間xの関係

となっている。この直線の傾きは1min 当たり約20㎡であり、1min の放水開始の遅速によって鎮圧面積が約20㎡増減することを意味する。また、直線の間隔は約1min であるので、 Q_2 と Q_3 の放水量の差、すなわちポンプ車4台分は時間に換算すれば約1min に相当することがわかる。

つぎに、図 1-4-9に焼失面積Aとポンプ車台数Pの関係を示す。図中の点は、ポンプ車1台、3台および7台（それぞれ放水量 Q_1 、 Q_2 および Q_3 に相当する）の放水を行なった場合に鎮圧される焼失面積を示す。なお、図では放水開始時刻 $x_0 = 5$ 、10、15、20および25min の場合について示している。さらに、図中の破線 P_Y は、保野による所要ポンプ車台数の式 (1-4-5)を描いたものである。これは、ある焼失面積に対して、その火面の周囲を取り囲むのに十分なポンプ車台数を示している。ただし、火面を1:2となる矩形とし、実際の建物に凹凸部分や死角等があることを考慮して、火面周長を矩形周長のさらに50%増しとして、ポンプ車1台につき20mを割り当てている。したがって、

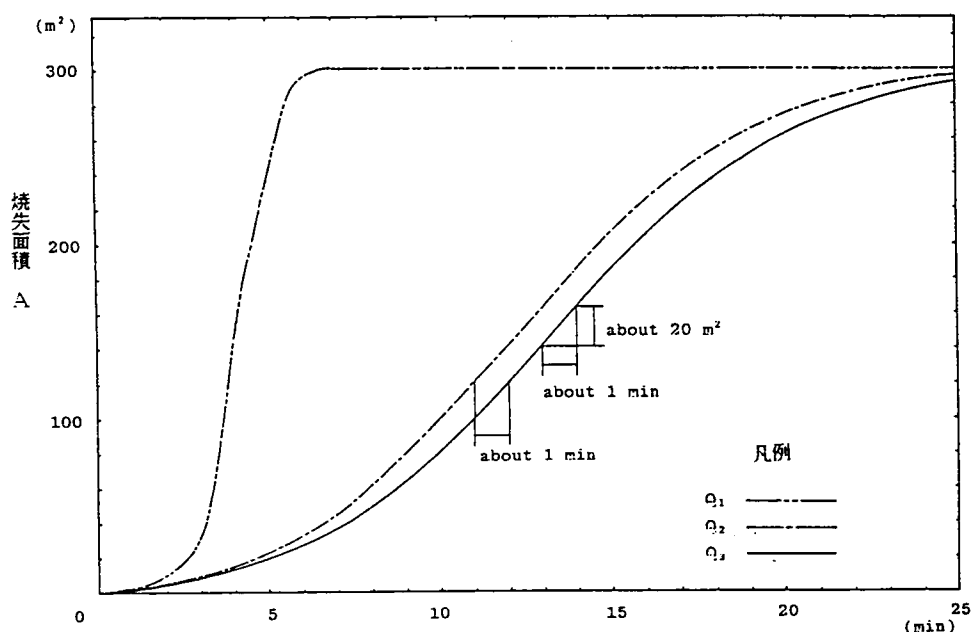


図 1-4-8 焼失面積Aと放水開始時間 x_0 の関係

図 1-4-9の破線 P_Y の係数0.318 の値は、実際には建物や火面の状況に応じて増減すると思われるので、ある幅を持ったゾーンとして議論すべきものと考えられる。しかし、ここでは式 (1-4-5)を標準的な所要ポンプ車台数を与えるものとする。

さて、実線はある焼失面積に鎮圧させるために必要なポンプ車台数であり、破線はその焼失区域を取り囲んで消火活動行なうのに十分なポンプ車台数を示す。したがって、実線と破線との交点は、ある焼失面積以内に鎮圧させるのに必要十分なポンプ車台数を示している。すなわち、 $x_0 = 10\text{min}$ 以下では、3台（鎮圧可能面積は100 m^2 程度）、 $x_0 = 10 \sim 13\text{min}$ では、4台（鎮圧可能面積は150 m^2 程度）、 $x_0 = 13 \sim 19$ では、5台（鎮圧可能面積は240 m^2 程度）ただし、これらは1台当たり1.0 ～1.2 m^3/min の放水ができるものと考えている。したがって、消防水利能力が基準よりも小さい場合などには、さらにポンプ車を補って放水をする必要がある。たとえば、標準的な放水開始時間 $x_0 = 8\text{min}$ の場合には、上述の $x_0 = 10\text{min}$ 以下の場合の必要十分なポンプ車台数3に補助的なポンプ車台数 α を加えて

$$P_1 = 3 + \alpha \quad (1-4-23)$$

と表わされるポンプ車台数分の放水を行なうことになる。実際にK市においては、第1

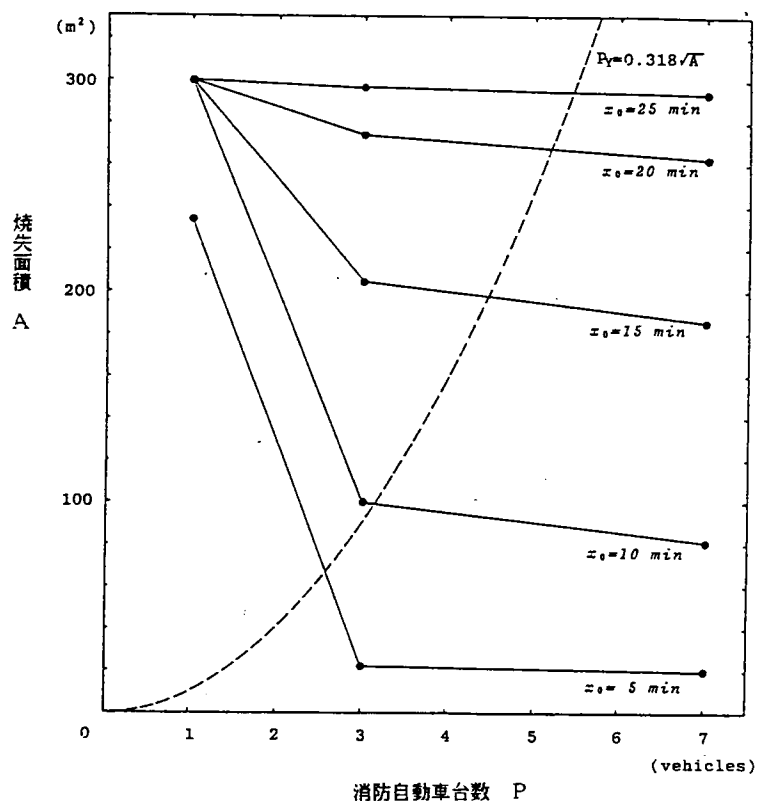


図 1-4-9 焼失面積Aと消防ポンプ自動車台数Pの関係

出場のポンプ車台数は4台であり、出動台数としては、ほぼ妥当であると思われる。しかし、消防水利の統計によれば、消防ポンプ車1台当たりの基準値 $1.0 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ を必ずしも満足できない場合もあり、消防水利の改善が遅れるのであれば、現実にはポンプ⁵¹⁾車を増加して放水量を多くする必要性が生じる。一般に、大都市になるほど、第1出場のポンプ車台数は多く、たとえば大阪市では5台、東京都では8台とされている。大都市になるほど、水利状況を始めその他種々の状況に応じた安全側を見込んだポンプ車台数で出動計画が立てられているものと思われる。

4. 5 年間火災統計によるモデルの検証

この節では、4. 3節で得られた延焼阻止モデルを用いて、都市における1年間の焼失面積の予測を試み、このモデルの妥当性の検証を行なう。

4.5.1 年間焼失面積の算定方法

(1) 地区の分割

都市をいくつかの地区に分割し、各地区における1年間に予測される焼失面積を求めて、それを合計して都市全体の年間の予想焼失面積とする。このように、都市をいくつかの地区に分割する理由は、延焼および延焼阻止要因が地区によって異なるためである。どのような大きさの地区に分割するのが適当であるかについては、別途検討を要すると思われるが、ここでは得られたデータの中で最も小さな単位500m×500mメッシュを1単位として計算した大阪市のケーススタディについて述べる。

(2) 焼失面積の算定手順

各メッシュの延焼危険のある木造建物群の建築面積 G (m^2)、風速 v (m/sec)、放水開始時間 x_0 (min)および放水量 Q (m^3/min)がわかっておれば、1火災についての焼失面積は、式(1-4-14)および式(1-4-15)より求めることができる。なお、式(1-4-15)における刻々の焼失面積 $A(t)$ と $A(t-1)$ を比較して、等しいかまたは増加の割合がわずかであれば、延焼阻止されたものと判断する。この判定基準としては、増加の割合を0.1%以下としている。

ところで、風速 v 以外の要素はある程度確定された値で、ほとんど年中変化しないと考えられるが、風速 v は確定された値をとらない。このことを考慮して、 i メッシュの焼失面積を風速 v の関数として、 $A_i(v)$ と表わして、風速 v の年間の確率密度関数を $f(v)$ とすれば、 i メッシュにおける1火災当たりの焼失面積の期待値 $E[A_i]$ は、次式で表わされる。

$$E[A_i] = \int A_i(v) f(v) dv \quad (1-4-24)$$

大阪の場合の年間の風速に関する確率密度関数については、C.Scawthorn⁵²⁾によってつぎのように表わされている。

$$\begin{aligned} f(v) = & \exp(-\exp(-1.0474(v-3.2067))) \\ & \times (-\exp(-1.0474(v-3.2067))) \\ & \times (-1.0474) \end{aligned} \quad (1-4-25)$$

この式は、大阪における1978年の1年間にわたる24時間平均風速のデータをGumbelの第1

種極値分布にあてはめて求められたものである。

なお、式(1-4-24)の $A_i(v)$ の一般式は求まっていないので、 $v=0,2,4,6,8,10(\text{m/sec})$ における6段階の数値積分により $E[A_i]$ を求めるものとする。つぎに、 i メッシュにおいて年間に P_i 件の出火が起こるものとすれば、式(1-4-24)によって求められた $E[A_i]$ を P_i 倍すれば、これが1年間に i メッシュにおいて予測される焼失面積である。地域全体の焼失面積 A は、すべてのメッシュの合計として

$$A = \sum \left\{ \int A_i(v) f(v) dv \times P_i \right\} \quad (1-4-26)$$

と表わされる。

(3) モデルの諸要素

モデルの要素の数値および数式についてはつぎのように設定している。

- ① メッシュに含まれる延焼危険のある木造建築面積の合計を $G(\text{m}^2)$ の値とする。この G の値は、風速によって異なる。各地区において、建ぺい率から算定される平均的な隣棟間隔が、式(1-3-4)における延焼限界距離より小であれば、延焼危険があると判断する。
- ② 放水開始時間 x_0 は、大阪市消防局が過去の実績により、行政地区単位の放水開始時間を定めているので、筆者がメッシュに対する値に換算した。換算方法は、1メッシュに含まれる行政地区の面積を重みとする放水開始時間の加重平均値としている。
- ③ 放水量 $Q(\text{m}^3/\text{min})$ は第1出場の消防ポンプ車5台が放水するものとする。式(1-4-21) [消防ポンプ車3台に相当] および式(1-4-22) [消防ポンプ車7台に相当] から係数を内挿することによって、5台分の放水量は

$$Q = 1.042 \cdot t^{0.527} \quad (1-4-27)$$

とした。

- ④ 1年間のメッシュ当たりの出火件数は、過去5年間(昭和48年～昭和52年)の平均値とし与件とした。
- ⑤ 対象地域のメッシュの合計は671個であり、大阪市全体の総面積の約86%を占めている。

53), 54)

大阪市における延焼阻止モデルの各要素の1メッシュ当たりの平均値を表1-4-3に示す。放水開始時間 x_0 は、8.2分、年間出火件数 P_i は、0.47件/年、建物群の建築面積 G は、風速によって異なるが、年間平均風速 $v=3.6 \text{ m/sec}$ の場合は 1413 m^2 であった。

表 1-4-3 延焼阻止モデルの諸要素の平均値

モデルの要素	平均値
放水開始時間 (x_0 : 分)	8.2
年間出火件数 (P_i : 件)	0.47
建物群の建築面積 (G : m^2)	1413

注) 500mメッシュ1ヶ当たりの平均値で、全体のメッシュは671ヶである。
Gの値は、風速により変化するが、表の値は年間平均風速 $v = 3.6 m/sec$ の場合について示したものである。

4.5.2 計算結果

以上ようにして求めた大阪市における焼失面積の計算結果を図1-4-10に示す。図1-4-10⁵⁵⁾には、比較のために昭和50年～昭和56年の火災統計値を記入している。予測値は実際の値の中間にあり、7年間の平均値と比べてやや小さな値となっているが、予測値と実際値は、比較的よく合っている。このように、本章で提案した延焼阻止モデルは、火災の実態をかなりよく説明する有効なものと評価されるであろう。

なお、分割メッシュの大きさをどの程度にすればよいかということについては、問題であると先に述べたが、この計算例の場合においては、計算結果から考えて500mメッシュ程度の分割で十分満足されるものと考えられる。

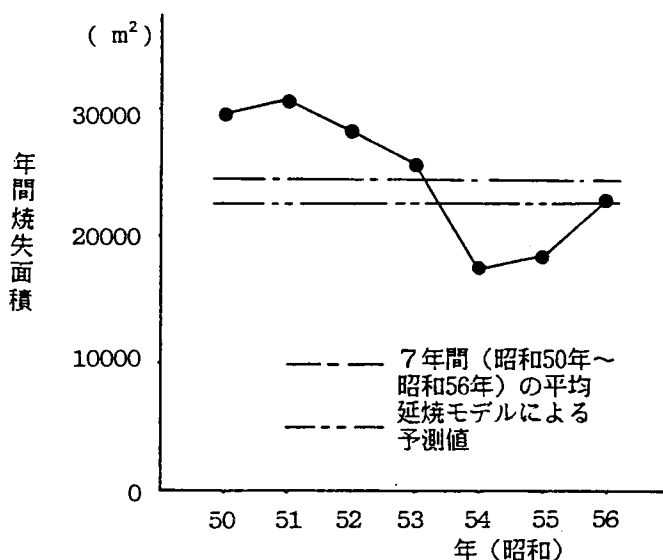


図 1-4-10 大阪市における年間焼失面積

4. 6 結言

この章では、建物火災の延焼および消火、とくに放水による延焼阻止効果について分析した。主要な結果は以下の通りである。

- (1) 消火放水量 Q の状況に応じた、放水開始後の時刻 t の焼失面積 $A(t)$ は式(1-4-14)および式(1-4-15)より求めることができることを示した。
- (2) 所要消火水量係数 q_0 と焼失面積 A_0 の関係は、式(1-4-18)で表わされた。
- (3) 消火放水量 Q_1 [式(1-4-20)]、 Q_2 [式(1-4-21)] および Q_3 [式(1-4-22)] は、それぞれ、消防ポンプ自動車1台、3台および7台に相当する。ただし、ポンプ車1台当たり $1 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ の放水が可能であるものとしている。
- (4) モデル火災($G=300 \text{ m}^2$ 、 $v=3.0 \text{ m/sec}$)の場合、ポンプ台数と焼失面積の関係から、出火後10min以内に放水を開始して焼失面積を 100 m^2 程度に鎮圧させるに必要な消防ポンプ車台数は3台となった。
- (5) 消火活動のされている火災データから、自然に延焼する場合の延焼モデル式[式(1-3-35)]の係数 a 、 c および G を、式(1-4-10)に関して最小2乗法を適用して求めることができることを示した。
- (6) この章で提案した延焼阻止モデルを用いて、都市における1年間の焼失面積を予測するケーススタディを行なった結果、計算値と実際値はかなりよく合い、このモデルの妥当性・有効性が確かめられた。

第5章 結論

本編では、都市防災計画のための火災延焼に関する基礎的な理論についての研究成果を述べるとともに、各種の考察を加えた。各章の要点を結論的に述べるとつぎの通りである。

第2章では、火災の現状および防火対策の現況について種々の火災資料や調査資料により基礎的な分析を行ない、各種の火災の原因、火災による損害の実態、ソフトおよびハードの防火対策の実態ならびに問題点などを把握した。住民の意識調査によれば日頃から火災、地震等に対して危険・不安感を抱いており、種々の防災対策への要望が強いことが指摘される。火災は平常時においても地震時においても発生することが予想されるので、多くの住民はこれに不安を示しており、消防力の強化という面からその被害を軽減させる対策を行なうことは重要な課題と考えられる。これが、本編における火災の延焼機構を分析し、できる限り火災の被害を抑えるための基礎を確立しようとする研究の背景である。

また、消防力は平常時の火災に対しては、かなりの充足率になっていることがわかったが、消防水利の放水能力や配置密度および耐震性については必ずしも満足されておらず、これらは重要な問題点である。地震時には、上水道等の都市供給施設は至る所寸断し、これに付設されている消火栓は使用できなくなることが予想されるが、耐震性の防火水槽はあまり整備されていない状況である。たとえば、最も震災対策の進んでいる東京都においても昭和55年12月の統計で、防火水槽の合計8,050基のうち1,418基（約18%）が耐震性のものにすぎない。恒久的な対策としては、上水道のパイプラインの耐震性を向上させて、消火用水および生活用水を確保する対策も必要であると思われる。しかし、これを達成するには、莫大な費用と時間を必要とし、すでに研究開発されて実用的な耐震性の防火水槽等の整備を平行して進めていくべきものと考えられる。この地震時の防災施設整備に関する問題点により、第2編における研究が必要となることを指摘した。

第3章では、実大家屋火災実験および火災資料を分析し、都市火災のより合理的な新しい延焼モデルを提案した。すなわち、従来の大部分の延焼モデルは大火のデータを基にしており、したがって出火後約1時間もしくはそれ以上の延焼状況（無限の可燃物が存在する場合）に重点が置かれているので、比較的小規模な通常の火災の延焼状況については必ずしもうまく説明できない。そこで、1棟または数棟が延焼する火災（有限の可燃物がある場合）に対して新しい延焼モデル式としてロスティック曲線〔式（1-3-42）〕を採用すると比較的うまく説明することができた。また、他の棟へ延焼拡大する場合には建物の構造や

隣棟間隔、建物周辺の工作物および樹木などが延焼に対して抵抗となると考えるが、それを考慮したものとして、延焼抵抗係数 $R = G^r$ （ r ：定数）で表わした。さらに、式（1-3-37）の係数 a の低減係数 α についてみると、 $\alpha = b / G^r$ （ b ：定数）と近似的に表示することができ、基準建物の場合には $\alpha = 1$ となり、 $G \rightarrow$ 大、 $\alpha \rightarrow$ 小となるものであり、各都市においては、建物および周辺の状況により異なるものと考えられる。

第3章においてロジスティック曲線を用いて表わした延焼モデルは、火災の出火から鎮圧までの延焼状況をかなりよく表わしており、従来の式はこの延焼モデル式（ロジスティック曲線）の変曲点まで、あるいは変曲点を連ねた線と同等のものであることがわかった。

また、K市およびS市における延焼モデル式（ロジスティック曲線）の係数 a および c を検討することにより、これらは風速および G の関数として表わさることを明らかにした。

第4章では、消防活動における放水量および放水開始時間の延焼阻止効果を定式化した。すなわち、消火放水量 Q の状況に応じた放水開始後の時刻 t の焼失面積 $A(t)$ は、式（1-4-14）および式（1-4-15）より求めることができることを示した。すなわち、このモデルにより建物の焼失面積と放水量および放水開始時間との関係が明らかとなったので、所与の放水量と放水開始時間に対して、放水効果の影響を受ける刻々の焼失面積を推定できるようになった。そして、この延焼阻止モデルを都市の火災の焼失面積の予測に適用した結果、予測値と実際値はよく合い、モデルの妥当性が検証された。したがって、第2編で示すように、このモデルを使うことにより、都市の適切な利用水量の計画や消防出動台数の計画、さらには土地利用の変更による火災危険度の減少効果を検討することができる。

以上が、本編で得られた主要な成果であるが、今後に残された課題を列挙すると以下の通りである。

- ① 本編では、防火に関する住民の防災意識・行動、いわゆるソフトの対策が必要であることを、アンケート調査等により指摘したが、今後さらに住民の意識、知識およびコミュニティ活動などの調査・研究を行ない、これら住民の防災意識の向上に役立たせるべきである。
- ② 本編では、木造建物により構成されている都市火災の延焼現象を面的な拡がりとして捉えて、焼失面積と放水量との関係を求めたが、たとえば延焼を阻止するための建物の建築構造等の検討のためには別途3次元的な火災延焼を考えてモデル化する必要があるだろう。

また、建築物の構造・形態、構造材料、気温等の自然条件等を取り入れた詳細な検討も今後の課題である。

③ さらに、石油タンク群やコンビナート等の密集する備蓄基地のような延焼ポテンシャルの極めて大きな地域での延焼モデルの解明は今後の課題である。

**第2編 地震時火災危険度を考慮した
都市防災施設および土地利用計画**

第 1 章 結 論

地震災害は、その誘因である地震と素因または拡大要因である土地条件等と被害主体との関係で決定される。これらの関係は、図 2-1-1 のようなブロック・ダイアグラムに示される。図における個々の関連を断ち切ること、あるいはできるだけ関連を小さくすることが、地震対策として行なわれる必要がある。最も根本的には、誘因→素因間を断ち切れば、災害は起こらないのは明らかであるが、沖積層などの軟弱地盤上に、しかも多くの木造建築物により構成されているわが国の都市の現況においては、災害を完全に防ぐことは困難であり、種々の多くの対策が必要となる。序論でも述べたように、地震災害においては、家屋の倒壊などの直接的な被害よりも、火災により焼失する被害の方が、大きくなる場合が予想される。本編では、地震時の火災を中心とした対策を取り扱う。

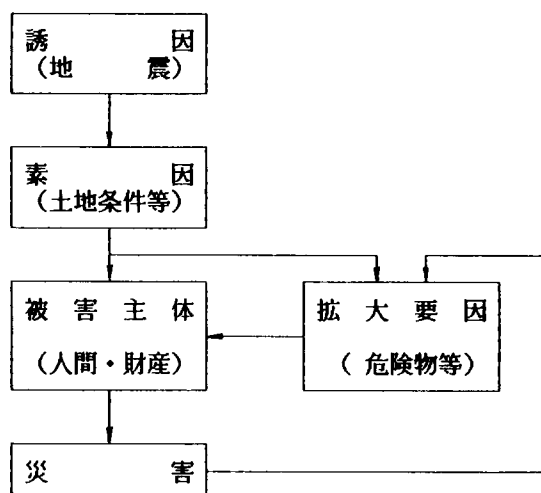


図 2-1-1 地震災害の構成

第 1 編第 2 章において、防火対策に関して明らかとなった問題点は、「①消防水利としては、その多くを消火栓に依存している。②耐震性を考慮した消防水利は極めて少ない。③加えて、多くの住民は、火災の出火・延焼に関して不安を抱いており、種々の防火対策への強い要望がある。」等であった。また、第 1 編第 3 章および第 4 章において、都市火災の「燃え」と「消し」のメカニズムを明らかにし、延焼および延焼阻止モデルを提案した。そして、これにより、消防力の投入による効果が算定できることを示した。そこで、この編では、地震時火災対策の 1 つとして、耐震性の防火水槽を整備することにより、被害を最小限に止めるための消防対策を考える。消防水利施設として、耐震性の防火水槽を

整備することのほかに、上水道パイプラインの耐震性を高めることにより、地震時の消火用水ならびに生活用水を確保することを考えることも重要である。このような研究も一方では進められているが、信頼性の高い上水道パイプラインを実際の都市に完備するには、なお長い年月と莫大な費用がかかるものと思われる。耐震性の防火水槽はすでに研究開発されており、所定の空間と費用さえあれば設置可能である。また、耐震性の防火水槽は点的な整備を行なうので、面的なパイプラインに比べて応急的な対策に適している。しかし、どの程度の数量を配置すればよいかということについては、明確でなく、この点について本編第4章で明らかにする。ここで、耐震性の防火水槽の整備が応急的と述べたのは、当面の一時しのぎといった意味ではなく、いつ起きるかもしれない地震に対して、比較的早急に整備ができるものという意味である。耐震性が向上した上水道パイプラインが完備された後にも、降水量の不足等で断水する場合などが考えられ、これらの対策としても、双方の整備によって火災に対する安全性を高めていく方策が好ましいものと思われる。

一方、都市計画的な面からみれば、地震時火災をはじめとする災害の危険性は、地盤や地形等に左右されるために、これをできる限り小さくするように地域内の各地区の土地利用用途を適正な配置に変更する対策も有効な手段と考えられる。すなわち、本編第5章では、従来においては、あまり考慮されなかったこれら防災的見地を含めた土地利用計画について考察する。

以下、各章の研究内容について要約すればつぎのようである。

第2章では、統計的決定理論による決定樹木分析の考え方について述べ、それを火災へ適用した。そして火災事象を確率モデルとして扱い、耐震防災施設の設計評価基準を費用最小とした場合の耐震防災施設の整備水準を求める方法を定式化した。

第3章では、地震時火災危険度および地震時火災によるリスクを定義するとともに、具体的な例として大阪市についての数値を求め、従来の値と比較検討を行なった。

第4章では、耐震防火施設として、防火水槽の整備に関し、第2章で定式化された防災計画および第3章の地震時火災によるリスクの予測モデルを用いて、ケーススタディとして大阪市に適用した分析結果を述べている。

第5章では、土地利用用途の配置について、種々の環境の評価値と許容値との差を最小とする目標計画法による定式化を行ない、従来の都市の機能論的な計画手法に加えて防災的見地を考慮した再配置計画の方法論を展開している。

第6章では、第2章～第5章で得られた主要な成果について結論的に要約している。

第2章 意志決定理論による地震時防災計画の定式化

2.1 緒言

第1編でも述べたように、火災は平常時のみならず地震時にも発生する。とくに、地震時には、多数の出火点より延焼拡大していくことが予想される。一方、わが国の地震予知の研究は、国家的プロジェクト事業として行なわれており、研究・観測体制が強化され、地震による災害の防止、被害の軽減のために警戒宣言が発せられるように法制度化される⁵⁶⁾までになってきている。しかし、物理的に地震が予知できたとしても、現在の都市の立地条件や土地利用等の状況を考えると、地震災害を完全に防ぐことは困難である。ただし、地震災害を減らすことは可能であって、平常時から、大地震が発生した場合にできるだけ被害を軽減させるための防災計画を立案し、災害予防対策をしておくことが重要であろう。

地震を対象とした防災計画では、地震の生起に関する不確実性、構造物・施設の地震応答に関する不確実性、火災等の災害発生に関する不確実性により、多くの不確定な要素の含んだ地震危険度が評価されなければならない。このような計画は、「不確実性下の意志決定問題」⁵⁷⁾と言える。

本章では、意志決定理論に基づく決定樹木分析について述べ、これを地震時火災へ応用し、地震時防災計画の定式化を行なう。なお、本章は、第4章における具体的な耐震防災施設計画を検討するために、その基礎として理論的考察を行なうものである。

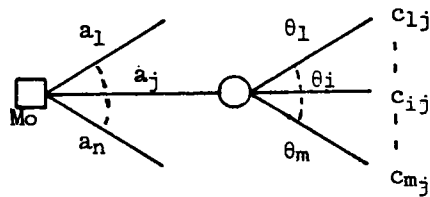
^{57), 58), 59)}

2.2 決定樹木分析

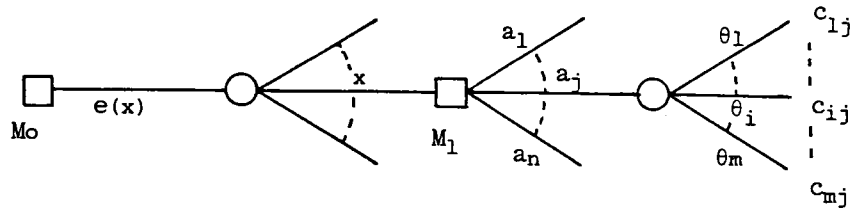
不確実性下の決定理論では、「不確定な自然の状態 θ_i に対し、考えられる行動案 a 」をとったとき、結果 $c_{ij}(\theta_i, a)$ が得られる場合、行動案集合 $A = \{a\}$ のうち、最良の結果をもたらす案を選定する」というのが基本的な枠組である。

意志決定者が、自然の真の状態 $\theta_i \in \Theta$ を仮に知ることができれば、結果 c_{ij} をみて最良の結果を与える $a \in A$ を決定できるが、通常、自然の状態は意志決定者にとっては不確実で、過去の経験や知識によってその確からしさを判断するしか方法はない。このような「自然の真の状態」の確からしさを確率測度で表現したものを $\xi(\theta)$ と書く。もし、意志決定者が $\xi(\theta)$ について、何の情報もなく、主観的に判断する場合には、これを主観確率と呼び、 $\theta \in \Theta$ に関する情報との結合を考えたものは、統計的決定理論と呼ばれてい

るのは周知の通りである。このとき、 $D = \{A, \theta, C, \xi\}$ を基本決定問題という。ここで、 A は行動空間、 θ は状態空間、 C は結果空間といい、これらが有限集合である場合には、図 2-2-1に示すような決定樹木で問題を表現すると理解しやすい。決定問題で、決定者がある分枝を選択すべき分岐点を□印で示し、これを決定手番と呼ぶ。決定者がある分枝を制御できないままに分枝が選定されるべき分岐点を○印で示し、これを偶然手番と呼ぶ。図 2-2-1(a) は情報が入手されていない場合の基本決定問題の決定樹木で (b)は情報を入手するために実験を実施する場合の決定樹木を示している。



(a) 基本決定問題の決定樹木



(b) 情報を得る場合の決定樹木

図 2-2-1 決定樹木

さて、意志決定者が結果として期待される利得額の大きいものが良い行動であるという基準を持つ場合、行動 $a \in A$ の期待金額 $U(a)$ は次式で与えられる。

$$U(a_j) = \int_{\theta} c(\theta, a_j) \xi(\theta) d\theta \quad (2-2-1)$$

この式は、意志決定者の持つ確率 $\xi(\theta)$ によって結果が変わってくるので、これを $U(a | \xi)$ と表わせば

$$U(a_j | \xi) = \int_{\theta} c(\theta, a_j) \xi(\theta) d\theta \quad (2-2-2)$$

意志決定基準は、開発事業等であれば、一般に期待金額が最大であるので、 $U(a|\xi)$ を最大にする行動 a^* が最適行動である。すなわち

$$U(a^*|\xi) = \max_{a_j \in \Lambda} U(a_j|\xi) \quad (2-2-3)$$

で与えられ、この場合の期待金額 $U(a^*|\xi)$ を基本決定問題の評価値と呼ぶ。

一方、防災事業においては、投資と被害の合計の期待金額を最小とする基準を考える。また、本章では、 $\theta \in \Theta$ に関する統計的な不確実性は考えずに、 $\xi(\theta)$ が一意的に決まるとした場合、すなわち

$$U(a^*) = \min_{a_j \in \Lambda} \left[\int_{\Theta} c(\theta, a) \xi(\theta) d\theta \right] \quad (2-2-4)$$

における最適行動案 a^* を求める場合について論を進める。

2.3 地震時防災施設計画の定式化

2.3.1 地震火災を考えた決定樹木

ここでは、地震火災を考えた決定樹木を考察する。図 2-2-2は、ある地域において木造建物の総棟数を N 、土地利用を L 、消防体制のレベルを a としたときの 1 年間における建物火災の被害の関係の示した決定樹木である。偶然手番①から地震事象 E 、その余事象（平常） \bar{E} に分岐する。ここでは、地震動を表わす変数として、地盤の加速度応答スペクトル SA を用い、この SA がある基準 SO より大きいときを地震事象 E とみなす。つぎに、偶然手番②からは、建物の倒壊事象を表わす分枝が出ている。この場合のすべての事象は、建物の倒壊棟数を N_d で表わすと、 $0 < N_d \leq N$ （建物の倒壊が起こる場合：この事象を D とする）、 $N_d = 0$ （建物の倒壊が起こらない場合：この事象を \bar{D} とする）の $(N+1)$ 通りとなる。さらに、偶然手番③、④、⑤および⑥において火災の発生事象の分枝が出ている。この場合のすべての事象は、火災の発生数を N_f で表わすと、 $0 < N_f \leq N$ （火災が発生する場合：この事象を F とする）、 $N_f = 0$ （火災が全く発生しない場合：この事象を \bar{F} とする）の $(N+1)$ 通りとなる。図 2-2-2では、建物の倒壊の状態を、 $N_d = 0$ 、 $0 < N_d < N$ および $N_d = N$ の 3 通りとし、火災の状態を、 $N_f = 0$ 、 $0 < N_f < N$ および $N_f = N$ の 3 通り、または $N_{fo} = 0$ 、 $0 < N_{fo} < N$ および $N_{fo} = N$ の 3 通り（平常時の

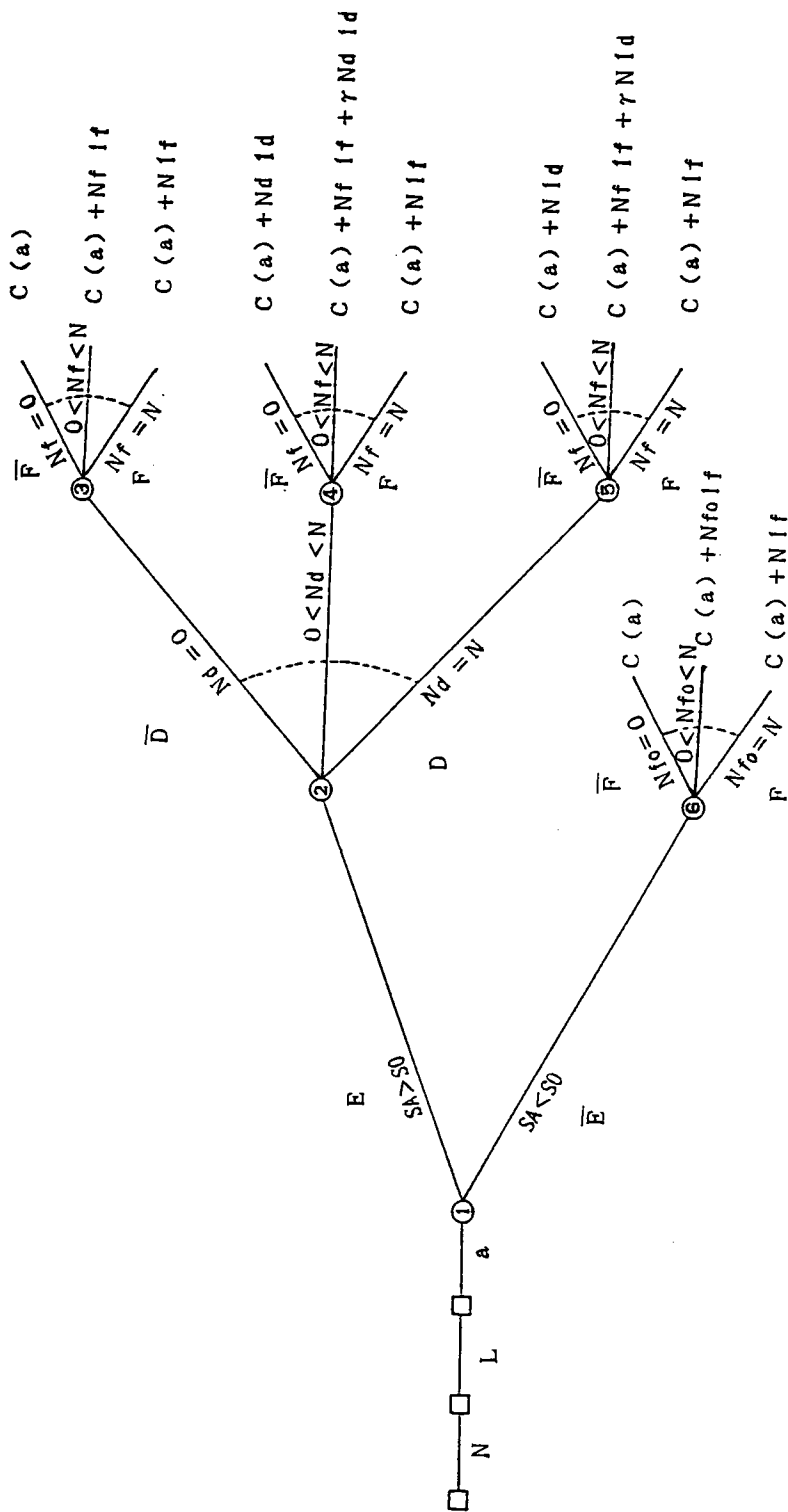


図 2-2-2 地震時火災を考えた決定樹木

火災の発生数を N_f と表わす) にまとめて示している。決定樹木の末端に、各々の事象における損失、すなわち防災施設の投資額と倒壊および火災損害額の合計を示している。決定樹木の各偶然手番におけるリスクは、各々の分枝事象のリスクとその確率を掛けて、加え合わせたものである。たとえば、偶然手番③でのリスク R_3 は、つぎのようである。

$$R_3 = C(a) + I_f(SA, v | N, L, a) \sum_{N_f=0}^N N_f P(N_f | N_d = 0) \quad (2-2-5)$$

ここに、 $C(a)$ ：消防体制のレベルを a にする場合の投資額（円）。

$I_f(SA, v | N, L, a)$ ：ある N 、ある L 、ある a のもとでの火災（出火）1件当たりの延焼を含む損害額（円／1件）。加速度応答スペクトル SA および風速 v の関数となる。以下、 I_f と略記する。

$P(N_f | N_d = 0)$ ：建物が倒壊せずに火災が N_f 件出火する確率。

この式は、地震時に建物が倒壊しないときに、火災事象を考慮した場合のリスクを示す。

また、偶然手番④でのリスク R_4 は、つぎのようである。

$$R_4 = C(a) + I_f \sum_{N_f=0}^N N_f P(N_f | 0 < N_d < N) + N_d I_d(N, L) \sum_{N_f=0}^N \gamma P(N_f | 0 < N_d < N) \quad (2-2-6)$$

ここに、 $I_d(N, L)$ ：ある N 、ある L のもとでの倒壊建物1棟当たりの損害額（円／1棟）。以下、 I_d と略記する。

$P(N_f | 0 < N_d < N)$ ：建物の倒壊数が $0 < N_d < N$ のときに、火災が N_f 件出火する確率。

γ ：倒壊棟数 N_d に対して、この中から火災（出火および延焼）の被害を受けたものを除く倒壊数にするための補正係数（ $N_f = 0$ のとき、 $\gamma = 1$ 、 $N_f = N$ のとき、 $\gamma = 0$ ）。

この式は、建物の倒壊数が $0 < N_d < N$ のときに、火災事象を考慮した場合のリスクを示す。

さらに、偶然手番⑤でのリスク R_5 は、つぎのようである。

$$R_5 = C(a) + I_f \sum_{N_f=0}^N N_f P(N_f | N_d = N) + N_d I_d \sum_{N_f=0}^N \gamma P(N_f | N_d = N) \quad (2-2-7)$$

ここに、 $P(N_f | N_d = N)$ ：建物の倒壊数が $N_d = N$ のときに、火災が N_f 件出火する確率。

この式は、地震時に建物がすべて倒壊したときに、火災事象を考慮した場合のリスクを示す。以上のリスク R_3 、リスク R_4 およびリスク R_5 の関係を示したものが、図 2-2-3である。

つぎに、偶然手番②でのリスク R_2 は、つぎのようである。

$$\begin{aligned}
 R_2 &= C(a) + \left[1f \sum_{N_f=0}^N N_f P(N_f | N_d = 0) \right] \times P(N_d = 0 | SA) \\
 &+ \sum \left[1f \sum_{N_f=0}^N N_f P(N_f | 0 < N_d < N) \right] \times P(0 < N_d < N | SA) \\
 &+ \left[1f \sum_{N_f=0}^N N_f P(N_f | N_d = N) \right] \times P(N_d = N | SA) \\
 &+ \sum \left[N_d \cdot 1d \sum_{N_f=0}^N \gamma P(N_f | 0 \leq N_d < N) \right] \times P(0 < N_d < N | SA) \\
 &+ \left[N \cdot 1d \sum_{N_f=0}^N \gamma P(N_f | N_d = N) \right] \times P(N_d = N | SA) \\
 &= C(a) + 1f \left\{ \sum_{N_d=0}^N \left[\sum_{N_f=0}^N N_f P(N_f | 0 \leq N_d \leq N) \right] \right. \\
 &\quad \left. \times P(0 \leq N_d \leq N | SA) \right\} \\
 &\quad + 1d \left[\sum_{N_f=0}^N \gamma P(N_f | 0 \leq N_d \leq N) \right] \\
 &\quad \times \left[\sum_{N_d=0}^N N_d P(0 < N_d \leq N | SA) \right] \quad (2-2-8)
 \end{aligned}$$

この式は、地震時の建物の倒壊および火災事象を考慮した場合のリスクである。

一方、偶然手番⑥（平常時火災）のリスク R_6 は、つぎのようになる。

$$R_6 = C(a) + 1f \sum_{N_f=0}^N N_f \cdot P(N_f | SA < S_0) \quad (2-2-9)$$



式 (2-2-8)および式 (2-2-9)の関係は図 2-2-4に示すとおりである。

最後に、この決定樹木全体におけるリスク R_1 は、つぎのようである。

$$\begin{aligned}
 R_1 = & C(a) + 1f \left\{ \sum_{N_d=0}^N \left[\sum_{N_f=0}^N N_f P(N_f \mid 0 \leq N_d \leq N) \right] \right. \\
 & \times P(0 \leq N_d \leq N \mid SA) \} \times P(SA > S_0) \\
 & + 1d \left[\sum_{N_f=0}^N \gamma P(N_f \mid 0 \leq N_d \leq N) \right] \\
 & \times \left[\sum_{N_f=1}^N N_f P(0 < N_f \leq N \mid SA) \right] \times P(SA > S_0) \\
 & + 1f \sum_{N_f=0}^N N_{fo} P(N_{fo} \mid SA < S_0) \times P(SA < S_0) \} \quad (2-2-10)
 \end{aligned}$$

ここに、 $P(SA > S_0)$ ：地震の起きる確率（加速度応答スペクトル SA が S_0 を越える確率）

$P(SA < S_0)$ ：地震の起きない確率（加速度応答スペクトル SA が S_0 を越えない確率）

2.3.2 耐震防火水槽の算定モデルの定式化

さて、式 (2-2-10) の各々の確率が分かれば、リスクを計算することができるのであるが、実際にこのような事象すべての確率は判明していない。

一方、式 (2-2-10) は、つぎのように表わすことができる。

$$R_1 = C(a) + 1f \bar{N}f + 1d \bar{\gamma} \bar{N}d + 1f \bar{N}fo \quad (2-2-11)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ここに、} \bar{N}f = & \left\{ \sum_{N_d=0}^N \left[\sum_{N_f=0}^N N_f P(N_f \mid 0 \leq N_d \leq N) \right] \right. \\
 & \times P(0 \leq N_d \leq N \mid SA) \} \times P(SA > S_0)
 \end{aligned}$$

$$\bar{\gamma} = \sum_{N_f=0}^N \gamma P(N_f \mid 0 \leq N_d \leq N)$$

$$\bar{N}d = \left[\sum_{N_f=1}^N N_d P(0 < N_d \leq N \mid SA) \right] \times P(SA > S_0)$$

$$\bar{N}fo = \sum_{N_f=0}^N N_{fo} P(N_{fo} \mid SA < S_0) \times P(SA < S_0)$$

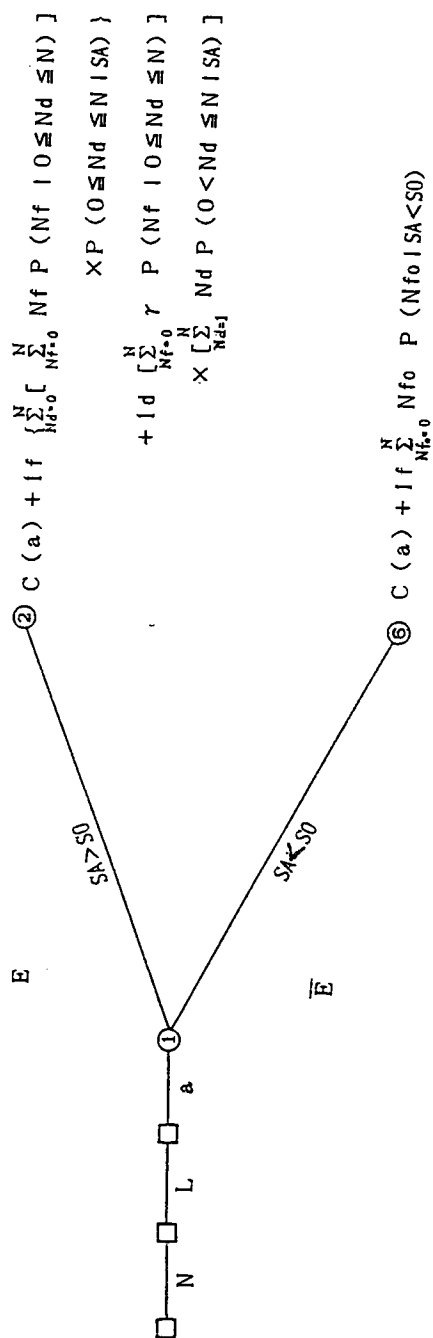


図 2-2-4 地震時および平常時のリスク

上式の $\overline{N_d}$ は、倒壊棟数の期待値を示すが、これは加速度応答スペクトルSAの関数とし⁶⁰⁾て過去の地震のデータより統計的に求められている。また、火災の発生件数の期待値 $\overline{N_f}$ ⁶¹⁾は、倒壊率(N_d / N)との関数で表わされている。これらの詳しい数式については、第3章で述べる。 $\overline{\gamma}$ は、倒壊した建物の中で、火災(出火・延焼)の被害を受けない棟数に補正するための係数($0 \leq \overline{\gamma} \leq 1$)であるが、これについては、過去のデータが不足しており明らかでない。本研究では、消防施設のレベルaの整備を考えており、この整備の充実によって、倒壊の被害は増減しないので、式(2-2-11)の右辺第3項は考慮しない。したがって、 $\overline{\gamma}$ が不明であっても以後の定式化に何ら支障はない。

また、耐震防火水槽は、地震時の火災によるリスクを軽減させるものであるので、式(2-2-11)の第4項の平常時の火災によるリスクは省いて、第1項と第2項のみを考慮した次式を耐震防火水槽の算定モデル式とする。

$$R_1 = C(a) + I_f \overline{N_f} \quad (2-2-12)$$

さて、式(2-2-12)は、ある地域において木造建物の総数N、土地利用Lおよび消防体制のレベルをaにしたときの、ある加速度応答スペクトルSA、ある風速vのときのリスクであり、 $R_1(SA, v | N, L, a)$ と表示される。ここで、加速度応答スペクトルSAの確率密度関数を $\xi_{SA}(SA)$ 、風速vの確率密度関数を $\xi_v(v)$ とし、これらとの積をSAおよびvで積分したものをトータルリスクと呼び、次式で表わす。

$$\begin{aligned} R(N, L, a) &= \int \int R_1(SA, v | N, L, a) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \\ &= C(a) + \int \int I_f(SA, v | N, L, a) \\ &\quad \times N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \end{aligned} \quad (2-2-13)$$

したがって、防災施設を整備するための評価基準としてトータルリスクを最小とすることを考えるならば

$$\min_{a \in A} \{R(N, L, a)\} \quad (2-2-14)$$

とする最適な消防体制のレベル案 a^* を求めて計画を実施すればよいことになる。ここで、Aは消防体制のレベルaの集合であるが、以下においては、消防体制のレベルの具体的な施設計画として、耐震防火水槽の整備のレベルを考える。すなわち、対象とする地域にど

の程度の数量の耐震防火水槽を設置すればよいかという問題を考えるものとする。

2.3.3 地震時火災の被害軽減対策

前節までの論点は消防力の強化による地震時火災の被害軽減対策に注目していた。すなわち、個々の建物の状況や土地利用の形態は、現在のままと仮定していた。しかし、式(2-2-13)に示されるように、トータルリスクは、木造建物棟数 N および土地利用 L にも依存する。したがって、理想的には、建物の耐震・耐火化、有効かつ適切な土地利用および消防力の強化のそれぞれを同時に考慮すべきであるが、実際には莫大な費用や時間がかかるので、まず前節では比較的、現実的な消防力の強化についてのみ取り上げることとした。しかし、地震時火災の対策としては、これらの建物の耐震・耐火化あるいは、有効かつ適切な土地利用などについても検討されなければならない。建物の耐火化については、ある程度実現しているものの、とくに住宅は、それほど耐火化されているとはいえない。諸外国のように、法律によって、木造を禁止すれば、都市の不燃化が実現できるのであろうが、個人の趣向や経済的な問題あるいは風土・風習などの関係もあり、一朝一夕には問題は解決されそうにもない。したがって、本研究では、建物の耐火化については触れないこととする。一方、現行の都市計画では、建物用途の規制や土地利用規制は、都市の現状と発展過程の延長で指定されている場合が多いが、防災的見地を含めた計画を策定し、逐次実施して行くべきと考えられる。このような土地利用の計画については、第5章で基礎的な検討を行なう。

2. 4 結言

地震時防災計画において、防災施設の整備基準を如何なる値にするかということは、意志決定理論におけるいくつかの代替案を評価し、ある基準にもとづいて代替案の選択を行なう場合と同じ関係にある。

本章では、意志決定理論における決定樹木分析の手法を応用することにより、地震時火災に限定した防災計画の1つとして、耐震防火水槽を整備して消防力を強化する場合における最適な防火水槽数を求めるための定式化ができることを明らかにした。したがって、第4章において耐震防火水槽の配置数を算定するための基礎を形成したことになる。

また、防災施設の整備によって、トータルリスクが減少することのほかに、土地利用の整備等によっても、これが減少することに言及し、土地利用の適切な再配置を行なうこと

は被害軽減対策となりうることを示した。

第3章 地震時火災危険度の推定

3.1 緒言

前章ではトータルリスクを最小にするという基準にもとづいて、最適な防火水槽の設置数算定モデルを定式化した。これを実際に計算するには、各種の具体的な数式および数値が必要となる。これらに関して、C.Scawthorn の地震時火災危険度の予測に関する研究は参考となるものであり、次節で概説する。このC.Scawthorn の研究により、地震時火災によるリスクの予測が可能となったが、いくつかの仮定も含まれている。筆者は、C.Scawthorn の予測モデルにおいて、多くの仮定により組立てられている延焼阻止の部分に、第1編で作成した延焼阻止モデルを組み込み、より合理的な地震時火災によるリスクの予測手法を提案し、いくつかの検討を行なう。

3.2 従来の地震時火災に関する研究

3.2.1 木造家屋の地震時倒壊率

地震時には、地盤の揺れにより多くの建物で損傷、倒壊が発生する。C.Scawthorn らによれば、1978年6月12日の宮城県沖地震での仙台市におけるデータを解析した結果、木造家屋の倒壊率を地震の強さと関連づけて、次式で表わしている。^{62),63)}

$$\frac{Nd}{N} = 0.020145 \cdot SA^{2.525} \quad (2-3-1)$$

ここに、SA : 周期0.75sec、減衰5%の地盤の加速度応答スペクトル(g)の値。

(周期0.75sec は、強い地盤動が与えられた時の日本の木造家屋の固有周期に近い値である。)

N : 対象地域の木造家屋総数。

Nd : SAが与えられた時の、木造家屋の期待倒壊数。

$\frac{Nd}{N}$: 木造家屋の倒壊率。これを、あるSAのときの一戸の木造建物が倒壊する確率 $P(D|SA)$ と定義する。Dは建物の倒壊事象を表わす記号。

3.2.2 木造家屋の地震時出火率

地震時の木造家屋の倒壊率と炎上火災の出火率の関係は、従来より両対数グラフ上で直線関係にあることが知られていたが、水野は、つぎのように表わしている。⁶⁴⁾

$$\frac{N_f}{N} = 0.00289 \cdot (N_d / N)^{0.575} \quad (2-3-2)$$

ここに、 N_f ：倒壊率 (N_d / N) が与えられたときの、炎上火災の発生件数。

$$\frac{N_f}{N} : \text{倒壊率 } (N_d / N) \text{ が与えられたときの、炎上火災の発生率 (出火率)}$$

これを、一戸の木造家屋で炎上火災が発生する確率 $P (F0 | E)$ と定義する。 $F0$ は、炎上火災が発生する事象を表わす記号。

式 (2-3-2)は、倒壊率のみの関数として表わされている。さらに、詳しい分析では、季節および時刻を考慮した式が提案されている。⁶⁴⁾しかし、トータルリスクの計算には必要としないので、ここでは省略する。

3.2.3 地震時の焼失戸数

火災の地域的な延焼規模については、C.Scawthorn は、浜田・堀内の延焼速度式および^{62),63)}大阪市の建物配置状況を考慮して、1件の炎上火災による焼失戸数を次式で表わしている。

$$N_s (X_t, v) = 1.2125 [2.52 X_t^{0.24} \cdot v^{-0.3275} \\ \times [4.514 X_t \cdot v^{0.474} + 2.64 X_t \cdot v^{0.1455} - 0.3275] \quad (2-3-3)$$

ここに、 $N_s (X_t, v)$ ：風速 v (m/sec)、出火後 X_t 分における1件の炎上火災により焼失する木造家屋の戸数。

つぎに、出火後 X_t 分における1件の炎上火災により焼失する木造家屋の戸数の期待値 $E [N_s (X_t) | F0]$ は、風速分布の確率密度関数 $\xi v (v)$ が得られれば

$$E [N_s (X_t) | F0] = \int N_s (X_t, v) \xi v (v) dv \quad (2-3-4)$$

で表わされる。

ところで、温帯地帯に属する地点での風速分布については、Gumbelの第1種極値分布でうまく近似されており、大阪における1978年1年間の24時間平均風速のデータをGumbel分布^{62),63)}に適用し、次の累積分布関数が得られている。

$$E v(v) = \exp[-\exp\{-1.0474(v-3.2067)\}] \quad (2-3-5)$$

風速の確率密度関数 $\xi v(v)$ は、式(2-3-5)を v で微分した次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \xi v(v) = & \exp(-\exp(-1.0474(v-3.2067))) \\ & \times (-\exp(-1.0474(v-3.2067))) \times (-1.0474) \end{aligned} \quad (2-3-6)$$

そこで、C.Scawthornらは、大阪につき、式(2-3-3)および式(2-3-6)を用いて、いくつかの X_t についての式(2-3-4)を計算し、その近似式を数値計算により回帰して、焼失戸数^{62),63)}の期待値に関して、つぎのように求めている。

$$E[N_s(X_t) | F_0] = 40.55 X_t^{2.06} \quad (2-3-7)$$

3.2.4 延焼阻止時間

地震後の消防隊の到着時間 T_R (min)は、地震による交通障害や消防水利施設への被害^{62),63)}の発生により遅れるものと考え、地震の強さ SA に比例させて次式で近似している。

$$T_R = (0.15 + 0.85SA) \times 60 \quad (2-3-8)$$

また、消防隊が到着した後、火災延焼を止めるのに要する時間 T_F (min)は次式で与え^{62),63)}られている。

$$i) E[N_s(T_R) | F_0] \leq 9 \text{ のとき}$$

$$T_F = 20 \cdot E[N_s(T_R) | F_0] \quad (2-3-9-a)$$

$$ii) E[N_s(T_R) | F_0] > 9 \text{ のとき}$$

$$T_F = 180 + 20 \cdot \sqrt{E[N_s(T_R) | F_0]} \quad (2-3-9-b)$$

すなわち、1戸当たりの火災による地域的な延焼を止めるのに必要な時間を20分と仮定し、消防隊が到着するまでの時間 T_R 経過する間に燃えている戸数が9戸以下の場合には、それに比例した式(2-3-9-a)の値を、また9戸以上の場合には、延焼阻止のために投入している消防力の効率的な運用や、延焼地域の周辺部(たとえば、風下側)のみの消火で延焼阻止が行なわれることを考慮して、式(2-3-9-b)の値を延焼阻止時間と仮定している。

3.2.5 地震時火災危険度

強さSAの地震が発生したときに、木造家屋1戸の火災によって生じる焼失戸数の期待値は、次式で与えられる。

$$E[N_s | SA] = E[N_s (T_R + T_F) | F_0] P(F_0 | D) P(D | SA) \quad (2-3-10)$$

大阪市については、種々のSAを式(2-3-10)に代入した数値計算により

$$E[N_s | SA] = \exp[-\exp\{-2.526(SA - 0.86)\}] \quad (2-3-11)$$

が求められている。

つぎに、1年当たりの地震による木造家屋1戸の火災によって生じる焼失戸数の期待値 $E[N_s]$ は、強さSAの地震の1年当たりに発生する確率密度関数 $\xi_{SA}(SA)$ を求めるとができれば

$$E[N_s] = \int E[N_s | SA] \xi_{SA}(SA) dSA \quad (2-3-12)$$

により算出することができる。これを地震時火災危険度と定義する。

大阪における強さSAの1年当たりの発生確率に関し、その累積確率分布 $\Xi_{SA}(SA)$ はつぎのよう^{62),63)}に表わされている。

$$\ln[-\ln(\Xi_{SA}(SA))] = a - b \cdot SA + c \cdot SA^2 - d \cdot SA^3 \quad (2-3-13)$$

ここに、^{62),63)}a～dの定数は、つぎの3種類の地盤別に、表 2-3-1のような値が得られている。

3種類の地盤は、soft(軟い地盤)、interm.(中間の地盤)およびhard(硬い地盤)であり、それぞれ最近の沖積層、普通の地盤および岩盤を指す。式(2-3-13)をSAで微分して、SAの確率密度関数 $\xi_{SA}(SA)$ を求めれば、つぎのようである。

表 2-3-1 式(2-3-13)の係数a～dの値

soil	a	b	c	d
soft	0.625	26.38	84.7	123.4
interm.	0.576	34.47	143.04	284.53
hard	1.0875	73.88	539.1	1450.0

$$\xi_{SA}(SA) = \exp(-\exp(a - b \cdot SA + c \cdot SA^2 - d \cdot SA^3))$$

$$\times (-\exp(a - b \cdot SA + c \cdot SA^2 - d \cdot SA^3))$$

$$\times (-b + 2c \cdot SA - 3d \cdot SA^2)) \quad (2-3-14)$$

以上のような計算式を用いて、大阪市の木造1戸当たりの地震時火災焼失戸数の1年当たりの期待値すなわち、地震時火災危険度を算出した結果は

$$E[N_s] = \begin{cases} 0.0025 & \text{per annum} \cdots \text{soft} \\ 0.00113 & \text{//} \cdots \text{interm.} \\ 0.0006 & \text{//} \cdots \text{hard} \end{cases} \quad (2-3-15)$$

のようである。

以上で述べたC.Scawthornの地震時火災危険度の予測モデルのフローチャートを図2-3-1に示す。この予測モデルの特徴をまとめると、つぎのようである。

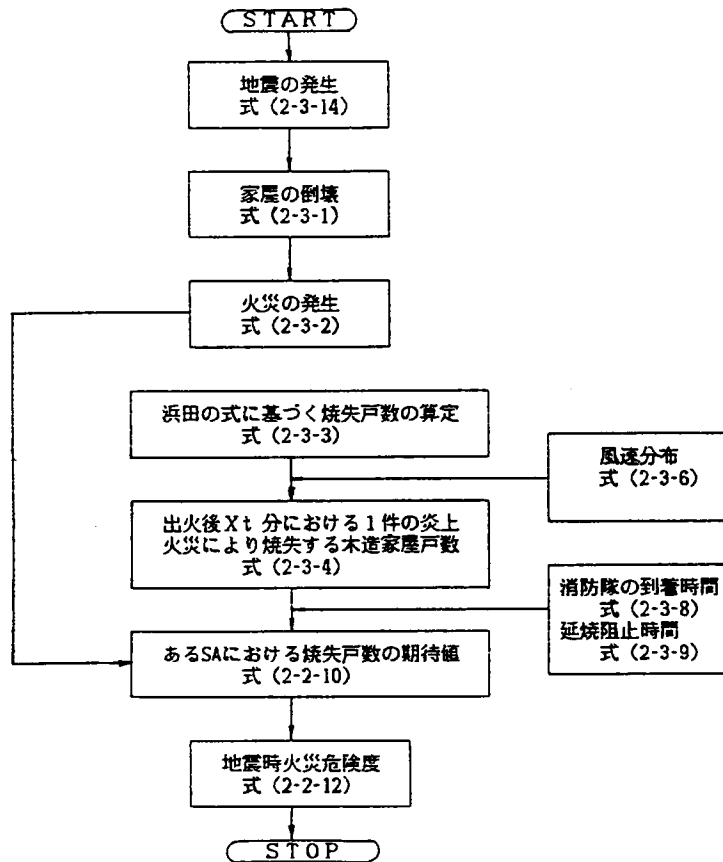


図 2-3-1 C.Scawthorn による地震時火災危険度の予測モデル

- ① 地震の規模として、地盤の加速度応答スペクトルSAを考えている。
- ② 地盤は、軟い地盤、中間の地盤および硬い地盤の3種類を考慮している。
- ③ 木造家屋の倒壊率を統計的に、SAの関数で近似している。
- ④ 出火率は、従来の水野の式を採用している。
- ⑤ 火災の延焼に関しては、浜田・堀内の式に基づいて、焼失戸数を求める式を導いている。
- ⑥ 年間の風速および加速度応答スペクトルの累積分布関数を、対象地域である大阪について、Gumbelの第1種極値分布で近似している。
- ⑦ 消防隊の現場への到着時間は、式(2-3-8)で仮定している。すなわち、平常時には、平均約9分程度であるが、SAが1gにもなる地震では1時間もかかるであろうとしている。
- ⑧ 1戸当たりの火災による地域的な延焼を止めるのに必要な時間を20分と仮定し、消防隊が到着するまでの時間が経過する間に燃えている戸数が9戸以下の場合と、9戸以上の場合について式(2-3-9)で仮定している。
- ⑨ 地震時火災危険度として、1年当たりの地震時火災による焼失戸数すなわち、式(2-3-12)で定義している。

3.3 筆者による地震時火災危険度の予測モデル

3.3.1 概説

前節における従来の研究によって、地震時火災危険度の予測手法について述べた。しかし、この手法は前述のように、延焼阻止に関しては、全くの仮定をしている。本節では、図2-3-2に示す第1編で述べた延焼阻止モデルを組み入れるものとする。なお、火災の被害を焼失戸数ではなく、焼失面積で評価するものとする。焼失面積で評価するのは、ここで、用いる延焼阻止モデルが焼失面積で表わされているためである。焼失戸数に換算することもできるが、そのようにするメリットはあまり考えられない。むしろ、焼失面積の方が単位が小さいので被害を表わす量として適しているといえよう。

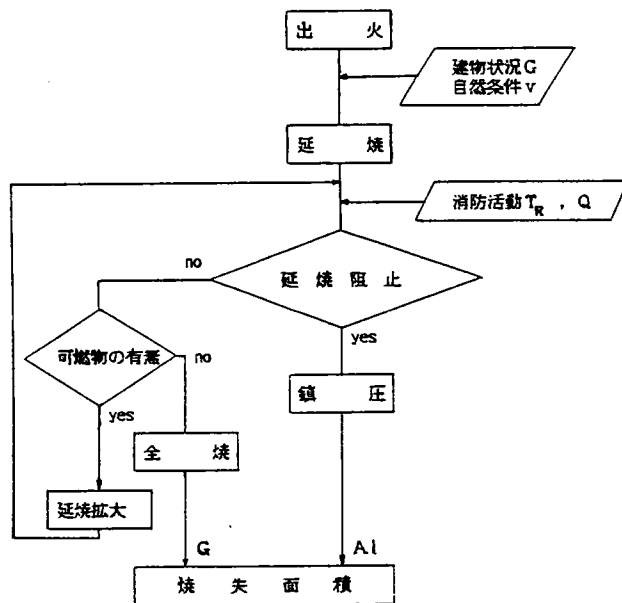


図 2-3-2 火災延焼阻止モデルのフローチャート

3.3.2 焼失面積と火災損害額

消防活動による延焼阻止効果を考慮した焼失面積の算出方法は、第1編 4.5.1で述べた。もう一度、略記すれば以下のようなものである。

対象地域（メッシュ分割された部分）において延焼危険のある木造建物群の建築面積 G (m^2)、風速 v (m/sec)、放水開始時間 $x_0(\text{min})$ および放水量 Q (m^3/min) がわかっているならば、焼失面積は、第1編、第4章における式 (1-4-14) および式 (1-4-15) より求めることができる。なお、式 (1-4-15) における刻々の焼失面積 $A(t)$ と $A(t-1)$ を比較して、等しいかまたは増加の割合がわずかであれば、延焼阻止されたものと判断する。この判定基準としては、増加の割合を0.1 %以下としている。

焼失面積が算定されれば、これを貨幣価値に換算して火災損害額とすることができる。ここでは、以下の仮定に基づき火災損害額を算定するものとする。

- ① 建物自体の損害額と内容物の損害額を含むものとする。
- ② 個々の建物および内容物の価値は、すべてに対して同じではなく、ある幅を持っているものと考えられるが、ここでは、平均的な焼失単価 (円/ m^2) を設定する。火災損害額は、この平均的な焼失単価に比例するものとする。

3.3.3 地震時火災によるリスクおよび地震時火災危険度の定義

本編第2章において、ある地域において木造建物の総数 N 、土地利用 L および消防体制のレベルを a にしたときのトータルリスクは

$$R(N, L, a)$$

$$= C(a) + \int \int l f(SA, v | N, L, a) N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \quad (2-3-16)$$

ここに、 $l f(SA, v | N, L, a)$ ：ある地域において木造建物の総数 N 、土地利用 L および消防体制のレベル a のもとで、ある加速度応答スペクトル SA 、ある風速 v のときの火災1件当たりの延焼を含む損害額。

$\xi_{SA}(SA)$ ：加速度応答スペクトル SA の確率密度関数。

$\xi_v(v)$ ：風速 v の確率密度関数。

$C(a)$ ：消防体制のレベルを a にする場合の投資額。

$N f(SA)$ ：ある SA のときの出火件数。

と表わされた。この式において、現状の N 、 L および a を考えれば、 $C(a) = 0$ であり右辺第2項のみとなる。ここで、損害額 $l f(SA, v | N, L, a)$ を焼失単価 U と焼失面積 $As(SA, v | N, L, a)$ との積で表わして、また、繁雑さを避けるために、 N 、 L および a を省いた次式を地震時火災によるリスク(Re)と定義する。

$$\begin{aligned} Re &= \int \int U \cdot As(SA, v) N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \\ &= U \cdot \int \int As(SA, v) N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \quad (2-3-17) \end{aligned}$$

これは、1年間における地震時火災による損害額の期待値を表わす。また、この式で、焼失単価 U を省いた次式を地震時火災危険度(Rs)と定義する。

$$Rs = \int \int As(SA, v) N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \quad (2-3-18)$$

これは、1年間における地震時火災による焼失面積の期待値である。

3.3.4 地震時火災危険度の計算

ここでは、式(2-3-18)で定義した地震時火災危険度を実際の都市に適用する方法について述べる。また、大阪市を対象にケーススタディを行ない、この地震時火災危険度を算出し、C.Scawthornの地震時火災危険度と比較する。

算定手順は、以下に示すように、第1編、第4章4.5における年間焼失面積の算定方

法とほぼ、同じである。

(1) 地区の分割

500m×500mメッシュを1単位として地震時火災危険度を地震時火災危険度を求める。このメッシュの単位で、地盤の種類が分類されている。すなわち、s o f t（軟い地盤）、i n t e r m.（中間の地盤）およびh a r d（硬い地盤）の3種類の地盤である。なお、焼失面積を予測するのにこの大きさのメッシュ単位で十分であることは、すでに第1編第4章で示した。

(2) 地震時火災危険度の算定に関する設定条件

第1編、第4章の式(1-4-14)および式(1-4-15)により計算する。計算に必要な諸量は、つぎのように設定している。

- ① メッシュに含まれる延焼危険のある木造建築面積の合計を G (㎡) の値とする。
- ② 放水開始時間は、C.Scawthorn によって仮定された式(2-3-8)における T_R （消防隊の到着時間）とする。
- ③ 放水量 Q (m³/min) は、現有の消防水利施設が地震時にもある程度有効であると仮定し、つぎの3段階のレベルを考える。すなわち、消防レベル1としては、1メッシュ当たり1台、消防レベル2は、1メッシュ当たり2台、消防レベル3は、1メッシュ当たり3台の消防ポンプ車により放水することができるとあるいはこれに相当する消防力を想定をしている。これらの放水量は、第1編、第4章の式(1-4-20) [消防レベル1に相当] と式(1-4-21) [消防レベル3に相当] およびこれから内挿したものの $Q = 0.648 t^{0.3475}$ [消防レベル2に相当] を用いる。
- ④ 出火率は、式(2-3-1) を採用する。
- ⑤ 加速度応答スペクトルSAの確率密度関数 ξ_{SA} (SA) は、式(2-3-14) を採用する。
- ⑥ 風速 v の確率密度関数 ξ_v (v) は、式(2-3-3) を採用する。
- ⑦ 対象地域のメッシュの合計は671 個であり、大阪市全体の総面積の約86%を占めている。s o f t（軟い地盤）のメッシュ数は、394、i n t e r m.（中間の地盤）のメッシュ数は、107、h a r d（硬い地盤）のメッシュ数は、170であった。
- ⑧ 式(2-3-18) の積分の計算は、加速度応答スペクトルSAおよび風速 v についての数値積分とする。SAについては、再現期間10年、20年、50年、100年、200年、および1000年に相当する規模の6段階、風速は、0、2、4、6、8および10m/sec の6

段階に分割して計算を行なった。

3.3.5 計算結果

以上ようにして求めた大阪市における地盤別の地震時火災危険度の計算結果を表 2-3-2 に示す。表 2-3-2 の各欄の上段は、式 (2-3-18) による木造家屋一戸当たりの地震時火災危険度であり、下段は、C.Scawthorn の定義による地震時火災危険度(備考欄の値)と比較するために、上段の値を木造家屋一戸当たりの焼失戸数に換算したものである。筆者による地震時火災危険度は、C.Scawthorn の値と比べれば、消防レベルの3種類とも小さい値を示している。これは、C.Scawthorn による方法では消防力の効果を全くの仮定に基づいて過小評価していること、および延焼速度の大きい浜田・堀内の式を用いていることなどにより被害の程度が大きくなっているからと考えられる。一方、筆者による方法は、最近の火災資料に基づき、作成した延焼および延焼阻止モデルを用いており、第1編において平常時の年間焼失面積の予測においてもその妥当性が示されたものである。しかし、消防のレベルをどのように仮定すればよいかについては明確でないが、自然水利や既設の人工水利がある程度用いることができるであろうことが期待される。ここで、消防レベル1の程度の消防力が確保される場合の地震時火災危険度とC.Scawthorn の値を比較すれば、Softで約1/5、Interm. で約1/2、Hardで約1/1.2 程度の差があることがわかる。

表 2-3-2 大阪市における地盤別の地震時火災危険度

地 盤	消 防 レベル 1	消 防 レベル 2	消 防 レベル 3	備 考
Soft	0.03785	0.06385	0.00435	
	0.000504	0.000087	0.000058	0.0025
Interm.	0.03427	0.03449	0.00197	
	0.000487	0.000049	0.000028	0.00113
Hard	0.02826	0.00204	0.00129	
	0.000415	0.000030	0.000019	0.0006

注1) 上段は、式 (2-3-18) による木造家屋一戸当たりの地震時火災危険度。

注2) 下段は、C.Scawthorn の定義による地震時火災危険度(備考欄の値)と比較するために、上段の値を木造家屋一戸当たりの焼失戸数に換算したものの。

3. 4 結言

この章では、前章で求めた地震時防災施設計画におけるトータルリスクの具体的な計算を行なうために、地震時火災によるリスクおよび地震時火災危険度を定義し、従来の研究と比較検討した。以下に主要な結果を述べる。

(1) 従来におけるC.Scawthorn による地震時火災危険度の予測手法は、地震の被害を確率・統計的に研究した優れたものであり、その概要を示した。この特徴は、火災の延焼に関しては、浜田・堀内の式を用いて、焼失戸数を求めるものであるが、延焼阻止に関しては全くの仮定をしている。

(2) そこで、筆者の第1編の延焼阻止モデルを、地震時火災危険度の予測モデルに組入れて、C.Scawthorn の手法を発展させ、新たに地震時火災危険度および地震時火災によるリスクを定義した。これにより、消防力の効果を考慮した実地的な地震時火災の被害が予測できることを示した。

(3) 地震時において既設の消防水利施設が利用できるかという点の問題はあるが、数種の消防レベルを設定し、大阪市における地震時火災危険度の計算例を示した。消防レベル1の程度の消防力が確保される場合の地震時火災危険度とC.Scawthorn の値を比較すれば、地盤の種類によっても異なるが C.Scawthorn の値の方が、約1.2～5倍程度大きいことがわかった。これは、C.Scawthorn による方法では消防力の効果を全くの仮定に基づいていること、および延焼速度の大きい浜田・堀内の式を用いていることなどにより被害の程度が大きくなっているものと思われる。

以上のようなが、今後の課題としては、上で述べた既設の消防施設の信頼性について明らかにすることなどが挙げられる。

第4章 耐震防火施設計画

4.1 緒言

防火施設、とくに消防水利施設の大部分は、上水道に付設された消火栓に依存していることを第1編第2章において述べた。ところが、大震時にはこの上水道をはじめとする都市供給施設いわゆるライフラインは至るところで寸断し、その機能は充分に発揮できなくなる⁶⁵⁾ことが指摘されている。したがって、地震時対策の1つとしては耐震性の防火水槽（以下耐震性を略して単に防火水槽と言う）を各所に設置しておく施策が効果的であるものと考えられる。この防火水槽は、各都市において整備計画が立てられており、不十分ながらも逐次設置されてきてはいる。ただし、東京都を除けばあまり積極的であるとはいえない⁶⁶⁾ようであるが、この東京都における防火水槽の設置基準は水利点から放水ホースが防火対象物の空間を覆うことができる面積（水利点からホース長を半径とする円の面積）をもとにしたものである。これによれば、『原則として、1メッシュ（250mメッシュ）内に総量100立方メートル以上の水量を確保するものとする。（この場合、防火水槽にあっては、100立方メートル1、または40立方メートル2とし、他の水利も同様の換算とする。ただし、火災予防審議会の答申（「東京都の地域別出火危険度と対策について」及び「東京都の地域別延焼危険度と対策について」昭和49年3月）に基づく危険度の低い地域（延焼危険度2以下の地域をいう。ただし、避難道路両側を除く。）にあっては、原則として1メッシュに総量40⁶⁷⁾立方メートル以上の水量を確保するものとする。』とされている。この水利点の配置数および容量の根拠については、必ずしも明確でなく、火災による被害と消防水利の能力の関係からそれらの数値を定めているものではない。

本章では、前章までに述べた火災危険度の予測モデルを用いて、トータルリスク（防火水槽の建設費と火災による損害額の合計）を最小にするという基準により、定式化された防災計画のうち、経済的な投資効率という側面に限定した防火水槽の最適な設置数モデルについて検討する。なお、本章では、ケーススタディとして大阪市を対象地域に選び、500mメッシュ単位（合計 671ヶ）で計算を行なう。

4.2 防火水槽の最適配置数の算定

4.2.1 算定モデルの概要

本編第2章において、ある地域において木造建物の総数 N 、土地利用 L および消防体制

のレベルを a にする場合の地震時火災を対象としたトータルリスクは、つぎのように定義された。

$$\begin{aligned}
 R(N, L, a) &= C(a) + \int \int I f(SA, v | N, L, a) N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \\
 &= C(a) + Re \\
 &= C(a) + U \cdot Rs
 \end{aligned} \tag{2-4-1}$$

ここに、 $C(a)$ ：消防体制のレベルを a にする場合の投資額。

$\xi_{SA}(SA)$ ：加速度応答スペクトル SA の確率密度関数。

$\xi_v(v)$ ：風速 v の確率密度関数。

$N f(SA)$ ：ある SA のときの出火件数。

$I f(SA, v | N, L, a)$ ：ある地域において木造建物の総数 N 、土地利用 L および消防体制のレベル a のもとで、ある加速度応答スペクトル SA 、ある風速 v のときの火災 1 件当たりの延焼を含む損害額。以下、 $I f(SA, v)$ と略記する。

$$I f(SA, v) = U \cdot As(SA, v | N, L, a) \tag{2-4-2}$$

$As(SA, v | N, L, a)$ ：ある地域において木造建物の総数 N 、土地利用 L および消防体制のレベル a のもとで、ある加速度応答スペクトル SA 、ある風速 v のときの火災 1 件当たりの焼失面積。以下、 $As(SA, v)$ と略記。

U ：焼失単価（円／㎡）

Re ：地震時火災によるリスク。1 年間における地震時火災による損害額の期待値を表わす。

$$\begin{aligned}
 Re &= \int \int I f(SA, v) N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \\
 &= \int \int U \cdot As(SA, v) N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \\
 &= U \cdot \int \int As(SA, v) N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \\
 &= U \cdot Rs
 \end{aligned} \tag{2-4-3}$$

Rs ：地震時火災危険度。1 年間における地震時火災による焼失面積の期待値を表わす。

$$Rs = \int \int As(SA, v) N f(SA) \xi_{SA}(SA) \xi_v(v) dSA dv \tag{2-4-4}$$

ここでは、火災危険度に影響を及ぼす消防体制のうち、防火水槽の最適配置の問題を考える。一般に、防火水槽を配置して消防体制を充実するに従い火災危険度は減少するけれど

も、これに必要な建設費は増加する。そして、
 図 2-4-1に模式的に示すようにトータルリス
 クは防火水槽数を増せば緩やかに減少するが、
 さらに防火水槽数を増しても、建設費の割に
 火災損害は減らず、ある配置数を境にトータ
 ルリスクは増大する傾向を示す。トータルリ
 スクを最小とする防火水槽数は経済的な観点
 から最適なものと考えられる。この最適な防
 火水槽数の算定方法のフローチャートを図 2
 -4-2に示す。

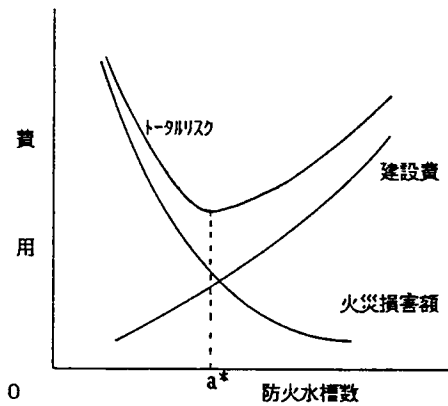


図 2-4-1 費用と防火水槽数との関係

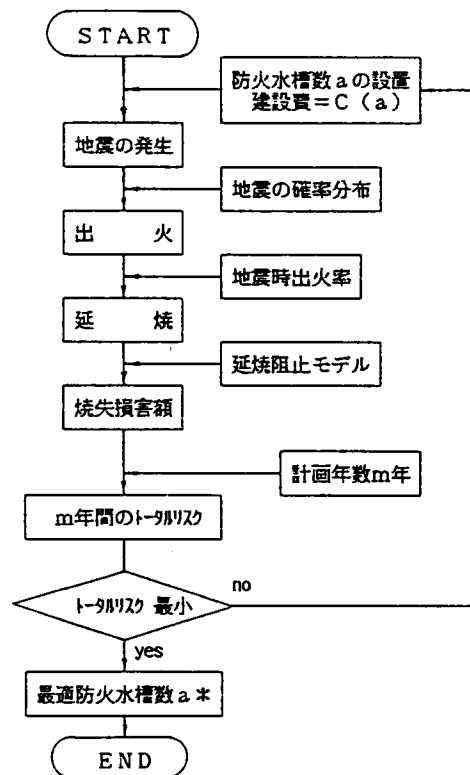


図 2-4-2 防火水槽数の算定フローチャート

4.2.2 地震時火災によるリスクの計算

前章3.3.4 における地震時火災危険度の計算とほぼ同様の計算手順である。主な項目について、まとめて以下に示す。

(1) 地震時の出火率

地震時の出火率に関しては、第3章で述べたように、C.Scawthorn^{68),69)} および水野^{70),71),72)}の地震時出火に関する予測式として、地震の規模を加速度応答スペクトルSA（周期0.75sec、減衰5%）で表わした次式を用いるものとする。

$$\frac{Nf}{N} \approx 2.965 \times 10^{-4} SA^{1.452} \quad (2-4-5)$$

ここに、Nf：あるSAにおける地震時の木造家屋の出火件数。

N：対象地域の木造家屋の総数。

また、大阪における強さSAの地震の確率密度関数 $\xi_{SA}(SA)$ は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \xi_{SA}(SA) = & \exp(-\exp(a - b \cdot SA + c \cdot SA^2 - d \cdot SA^3)) \\ & \times (-\exp(a - b \cdot SA + c \cdot SA^2 - d \cdot SA^3)) \\ & \times (-b + 2c \cdot SA - 3d \cdot SA^2) \end{aligned} \quad (2-4-6)$$

ここに、a～dの定数は、表 2-3-1示される値である。

(2) 延焼モデル

「延焼」に関しては、第1編第3章～第4章で述べた延焼および延焼阻止モデルを用いて焼失面積を算定する。以下にその概要を示す。

- ① 焼失面積 $As(SA, v)$ は、第1編、第4章の式(1-4-14)～式(1-4-17)により計算する。
- ② メッシュ(500m メッシュ)に含まれる木造建築面積の合計を $G(m^2)$ の値とする。
- ③ 放水開始時間は、C.Scawthornによって仮定された式(2-3-8)における T_R （消防隊の到着時間）とする。
- ④ 放水量 $Q(m^3/min)$ は、つぎの5段階のレベルを考える。すなわち、消防レベル1としては、1メッシュ当たり1台、消防レベル2は、1メッシュ当たり2台、消防レベル3は、1メッシュ当たり3台、消防レベル4は、1メッシュ当たり4台、消防レベル5は、1メッシュ当たり5台の消防ポンプ車により放水することができることと

るいはこれに相当する消防力を想定をしている。これらの放水量は、第1編、第4章の式(1-4-20) [消防レベル1に相当]、式(1-4-21) [消防レベル3に相当] およびこれらから内挿したものをを用いる。すなわち、放水量 Q (m^3/min)と時間 t (min)

との関係式 $Q = K_o t^{n_o}$ における各々の消防レベルに相当する係数 K_o および n_o の値を表 2-4-1に示す。また、この消防レベルにするための防火水槽の設置数をこの表に同時に記載している。この設置数の基準は、つぎの根拠による。すなわち、消防ポンプ車1台の守備範囲は、約6200 m^2 とされており、これは約1/4 メッシュの面積に相当する。したがって、1メッシュ内に必要とする消防水利数は、消防ポンプ車1台分の4倍となる。一方、消防ポンプ1台に必要な水量は、40 m^3 とされている。これを消防水利の1単位としている。防火水槽の種類には、40 m^3 容量のものと100 m^3 のものがある。100 m^3 のものは、容量は、2.5 倍あるがこれは2単位とみなされる。

表 2-4-1 各消防レベルの放水量および防火水槽の設置基準

消防レベル		消 防 レベル 1	消 防 レベル 2	消 防 レベル 3	消 防 レベル 4	消 防 レベル 5
区 分	放水量 Q の 係 数 値	K_o	0.451	0.648	0.845	0.9435
		n_o	0.258	0.3475	0.437	0.482
防 火 水 槽 設 置 基 準 (基/メッシュ)	40 m^3 の場合	4	8	12	16	20
	100 m^3 "	2	4	6	8	10

⑤ 地震時火災によるリスクは、焼失面積に焼失単価(円/ m^2)を掛けて求められる。

火災の焼損単価は、平常時の火災の単純な計算たとえば、昭和56年の火災統計から約7万円/ m^2 となるが、これは小火も含んだものであり、全焼または類焼する場合には、単価は上がるものと考えられる。実際、昭和51年の酒田大火の場合が、約27万円/ m^2 となっている。ここでは、幅を持たせて、10万円、20万円および30万円/ m^2 とする。

(3) 費用の時間的効果

つぎに、地震時火災によるリスクは、 m 年間という長期間にわたって評価するために時間的な効果を考慮して、社会的割引率の概念を導入する。この場合、地震時火災リスク(年間の地震時火災による損失額の期待値)を R_o とし、第 j 年の地震時火災リスクの現在

等価額を R_J とすれば

$$R_J = \frac{R_0}{(1+i)^J} \quad (2-4-3)$$

ここに、 i は社会的割引率である。一般に、資本の増殖率を利子もしくは割引率と言い、社会的割引率とは、社会資本のこの効率を測定する尺度であると定義される。我国の港湾計画においては、7～8%が多く採用されているようであるが、各国の社会的割引率の例⁷⁵⁾では、4～10%とかなりの幅がある。

さて、計画年数すなわち防火水槽の耐用年数を m 年とすれば、 m 年間の火災リスクの合計 R は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} R &= \sum_{j=1}^m \frac{R_0}{(1+i)^j} \\ &= R_0 \cdot \frac{(1+i)^m - 1}{i (1+i)^m} \end{aligned}$$

4.2.3 データの概要

⁷⁴⁾
大阪市の500mメッシュを単位とするデータを基本とする。計算に用いたメッシュはメッシュ内市域面積が、 $500 \times 500 = 250000 \text{ m}^2$ となるもので、水面の面積が 125000 m^2 以下のものに限定した。このようにした理由は、データの質をそろえること、面積の半分以上が水面であれば、自然水利が利用できるためにおそらく防火水槽を必要としないであろうと考えたからである。このように選定したメッシュは合計671ヶであった。

さて、大阪市の地盤分布状況および土地利用分布状況をそれぞれ図 2-4-3および図 2-4-4に示す。地盤は、図 2-4-3のように、市のほぼ中央の南北に堅い地盤（大阪層群と呼ばれる洪積層の丘陵地帯）があり、これを被覆するように軟い地盤（沖積平野）が周辺に存在している。つぎに、土地利用は住宅用途、工業用途、商業用途、その他の建物用途および非建物用途の5種類に分類した分布状況が図 2-4-4である。この分類の判定基準は、まず建物用途面積と非建物用途面積を比較しその割合の大きい用途とする。さらに建物用途の場合は、住宅、工業、商業の割合が50%以上であればそれぞれに対応する用途とし、いずれも50%未満であればその他の建物用途とした。図 2-4-4に示すように、大阪市の中心（北区、西区、東区、南区、浪速区）に商業用途が集中し、これをとり囲むように住宅用途の地域が広がっているが、その多くは東部と南部に集まっている。工業用途は、大

阪湾に面した地域および郊外に点在している。非建物用途メッシュは、大阪城公園等や大阪湾に面した地域に多い。

つぎに、建物状況および消防等に関するデータの基礎的な統計値を表 2-4-2に示す。

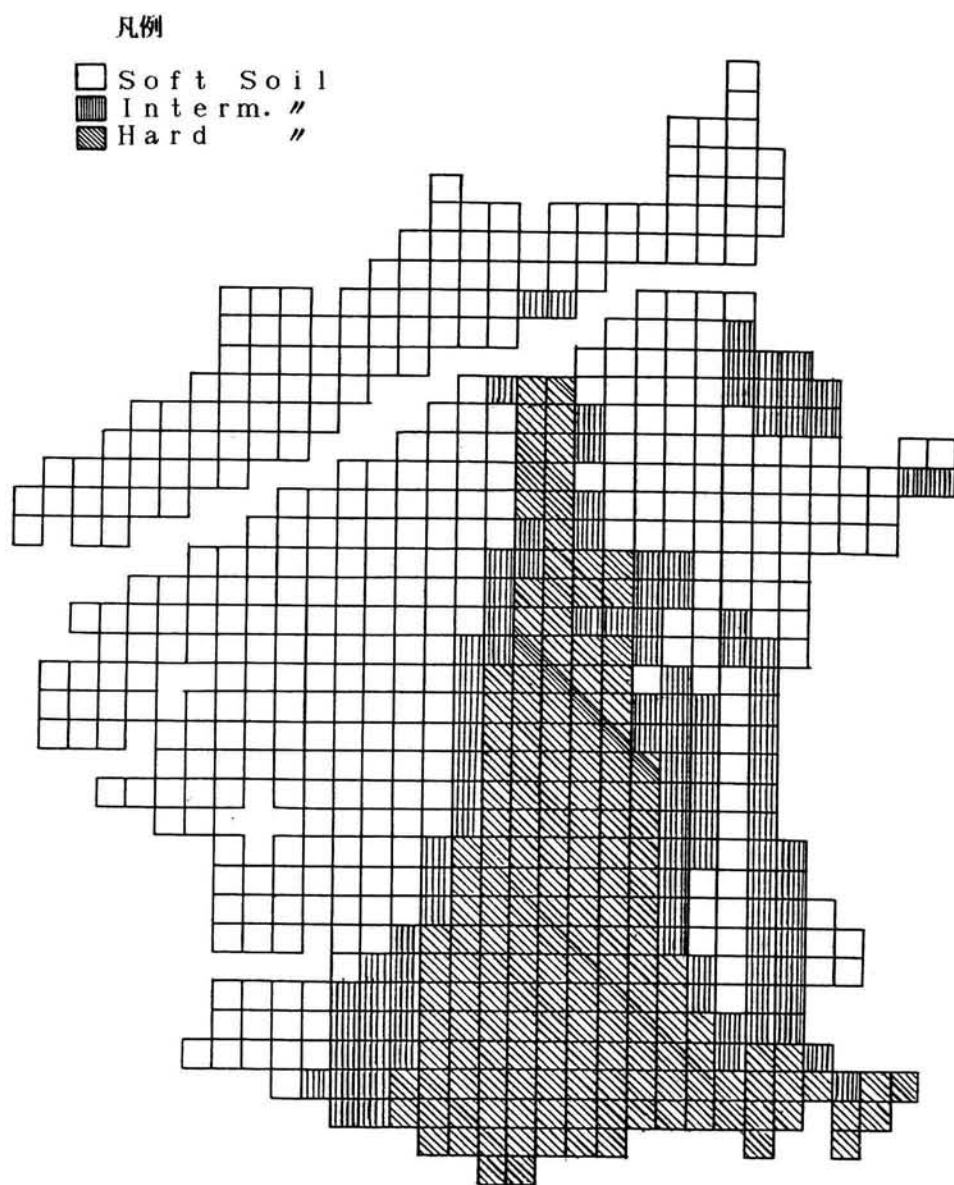


図 2-4-3 大阪市の地盤分布

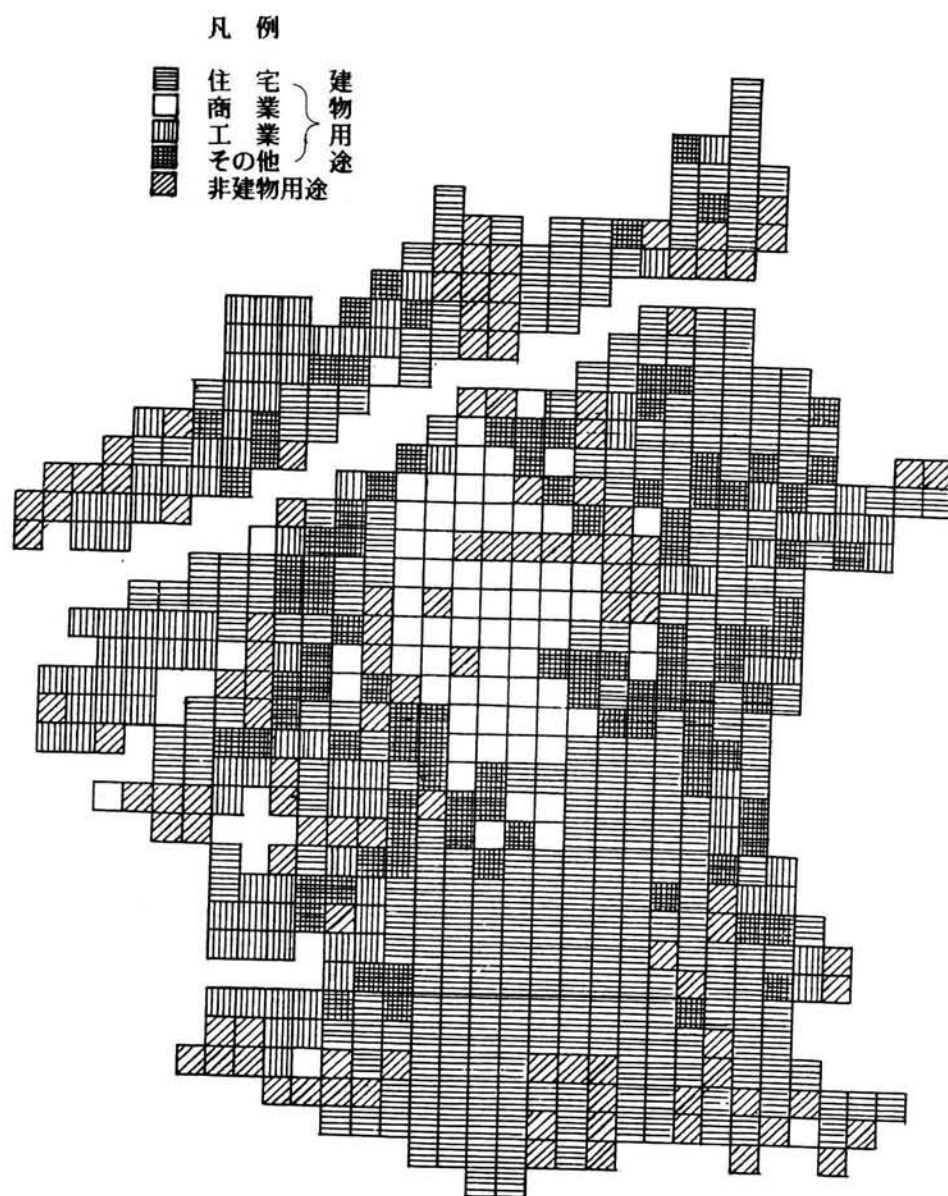


図 2-4-4 大阪市の土地利用用途分布

表 2-4-2 大阪市のメッシュ・データの平均値

項 目	平 均 値	標準偏差
人口 (人)	3783.1	2249.9
世帯数 (世帯)	1242.4	823.5
木造棟数 (棟)	1012.3	716.3
非木造棟数 (棟)	272.9	228.4
木造建築面積 (㎡)	422.5	265.6
非木造建築面積 (㎡)	336.8	178.9
平均建築面積 (㎡/棟)	48.3	20.8
平均階数 (階)	1.5	0.19
普通木造比 (%)	43.3	16.5
防火木造比 (%)	56.6	16.5
建ペイ率 (%)	48.5	13.0
消防水利 (単位)	38.6	17.6
消火栓 (単位)	29.3	12.5
全出火件数 (件)	1.92	1.18
焼失面積 (㎡/件)	60.4	62.6
消火開始時間 (分)	8.2	1.5
建物用途面積 (ha)	15.5	3.38
非建物用途面積 (ha)	9.49	3.39

備考：合計671メッシュの平均値

4.3 計算結果

さて、4.2.3に示したメッシュ・データを用いて4.2.1の算定モデルによって防火水槽の最適配置数を求めるが、以下の計算では、耐用年数 $m=25$ 年として、社会的割引率 $i=6, 7, 8\%$ 、火災の焼損単価 $=10, 20, 30$ 万円/㎡の各々3段階とする。防火水槽は容積 100 m^3 のものを2, 4, 6, 8, 10基/メッシュ（それぞれ8, 16, 24, 32, 40基/ km^2 に相当）の5ケースについて計算を行なう。容積 100 m^3 の防火水槽の単価は、 1000 万円とした^{*}。

社会的割引率 $i=6, 7, 8\%$ の3通りと、火災の焼損単価 $=10, 20, 30$ 万円/㎡の3通りの組み合わせを考え、合計9通りの場合の費用と防火水槽数の関係を図 2-4-5に示す。トータルリスクの最小値を求めるために、地震時火災によるリスクの各5点の値より、局所手続きによる補間を行ない平滑化した⁷⁶⁾。

* 筆者が東京消防庁および大阪市消防局にヒアリング調査したところ、現在（昭和57年）における防火水槽の1基当たりの価格は、おおむね 40 m^3 の場合450万円～500万円、 100 m^3 の場合約1000万円であった。

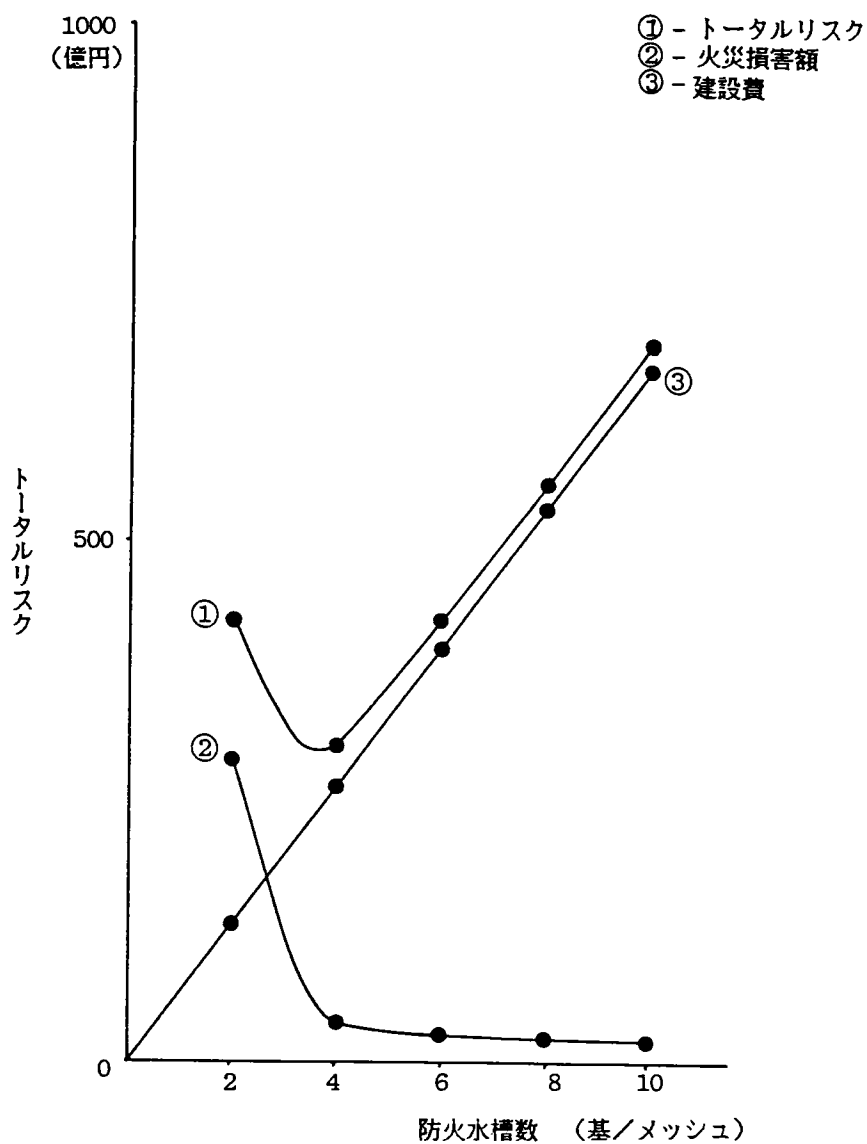


図 2-4-5 (a) トータルリスクと防火水槽数の関係
(社会的割引率6%、焼失単価10万円)

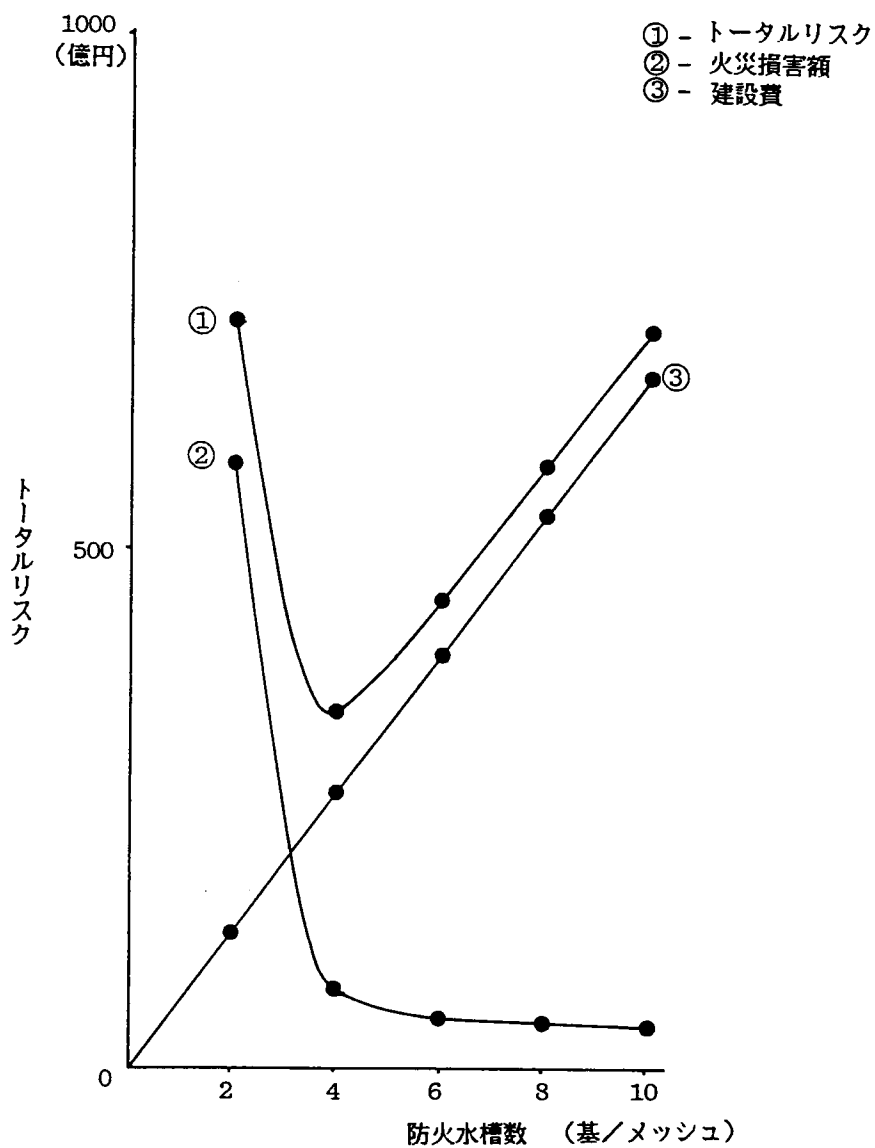


図 2-4-5 (b) トータルリスクと防火水槽数の関係
(社会的割引率6%、焼失単価20万円)

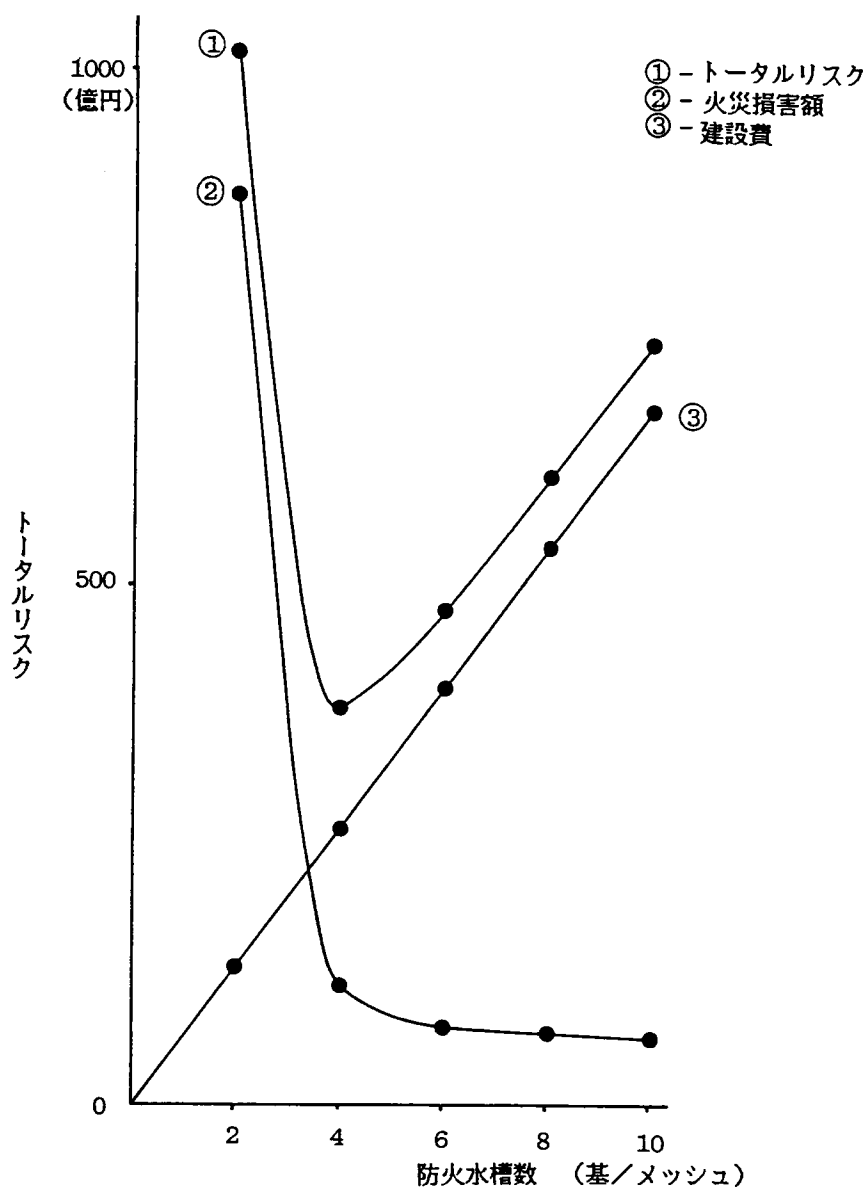


図 2-4-5 (c) トータルリスクと防火水槽数の関係
(社会的割引率6%、焼失単価30万円)

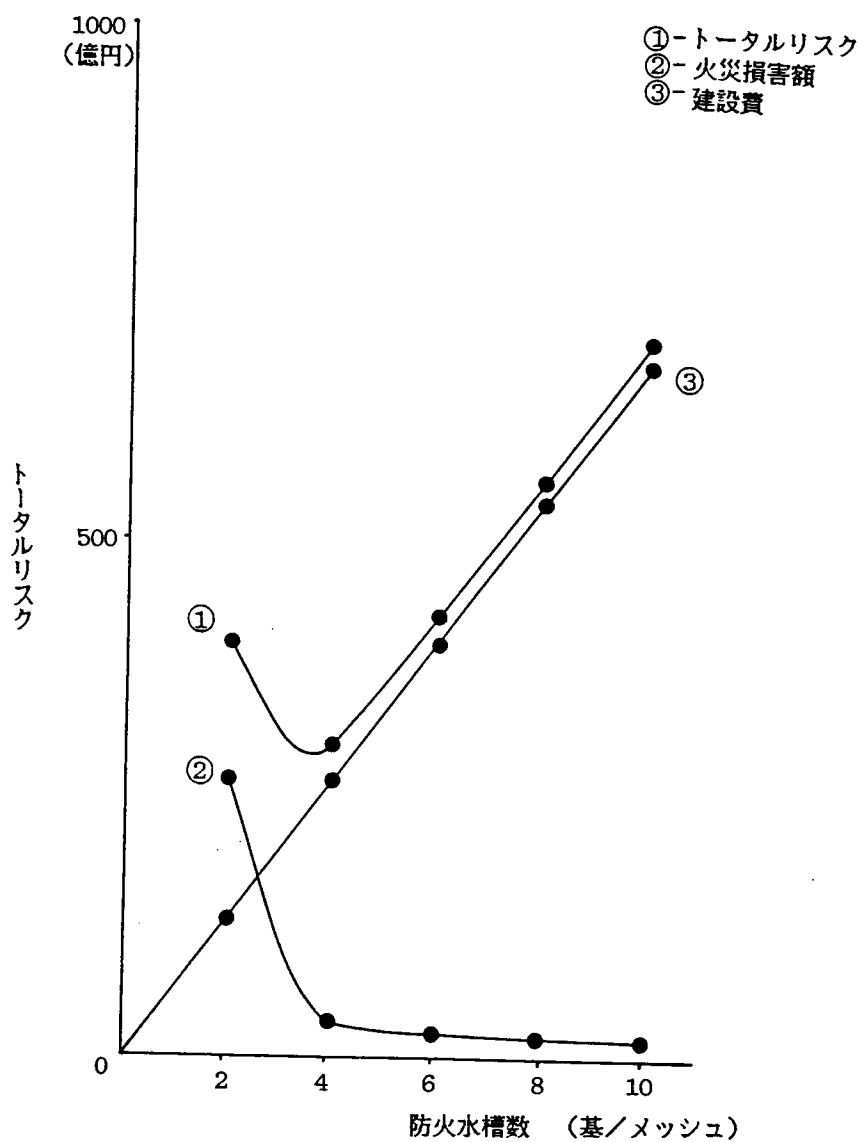


図 2-4-5 (d) トータルリスクと防火水槽数の関係
(社会的割引率7%、焼失単価10万円)

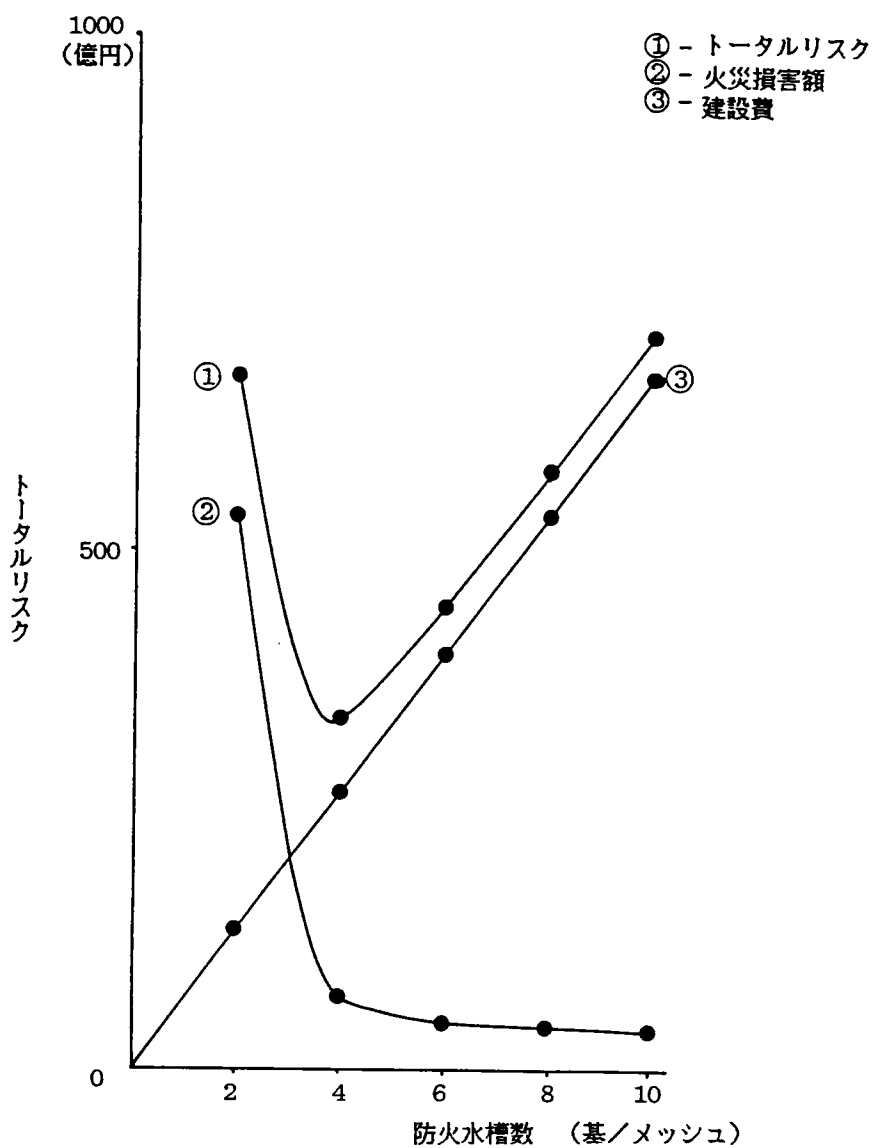


図 2-4-5 (e) トータルリスクと防火水槽数の関係
(社会的割引率7%、焼失単価20万円)

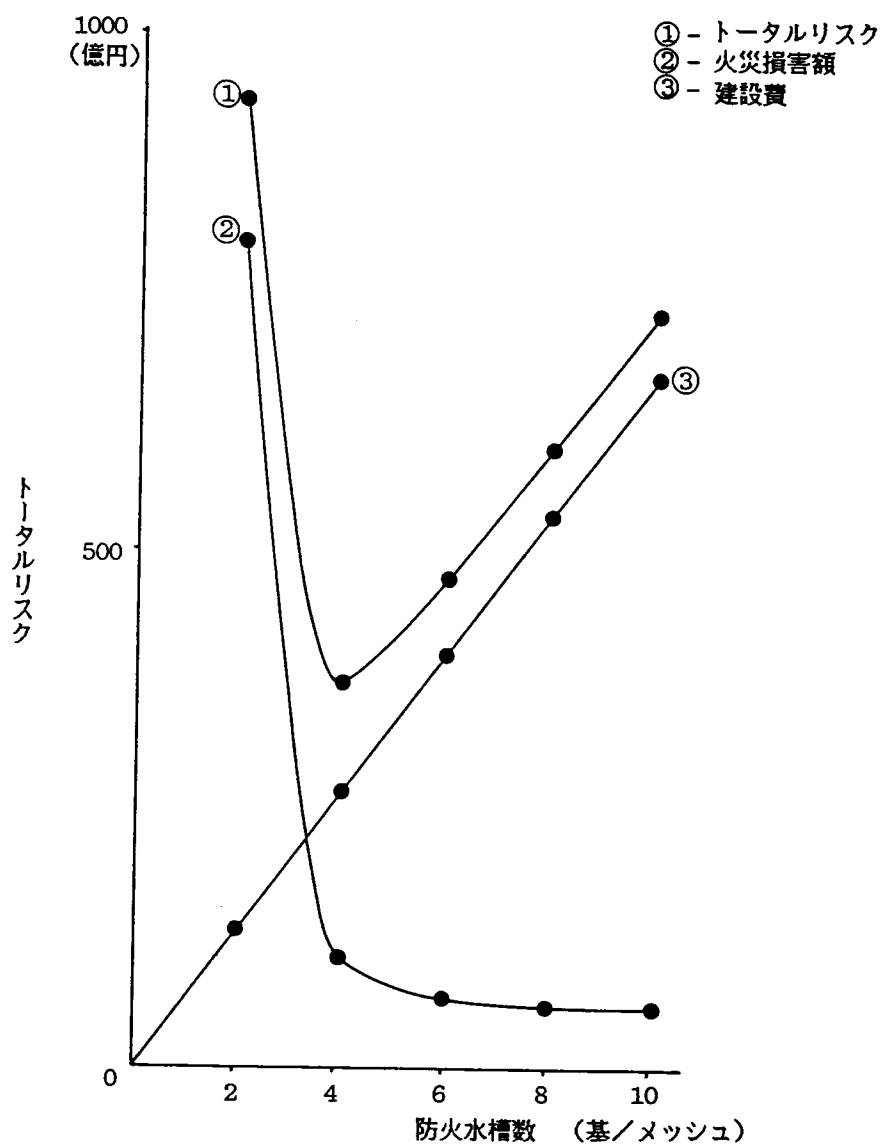


図 2-4-5 (f) トータルリスクと防火水槽数の関係
(社会的割引率7%、焼失単価30万円)

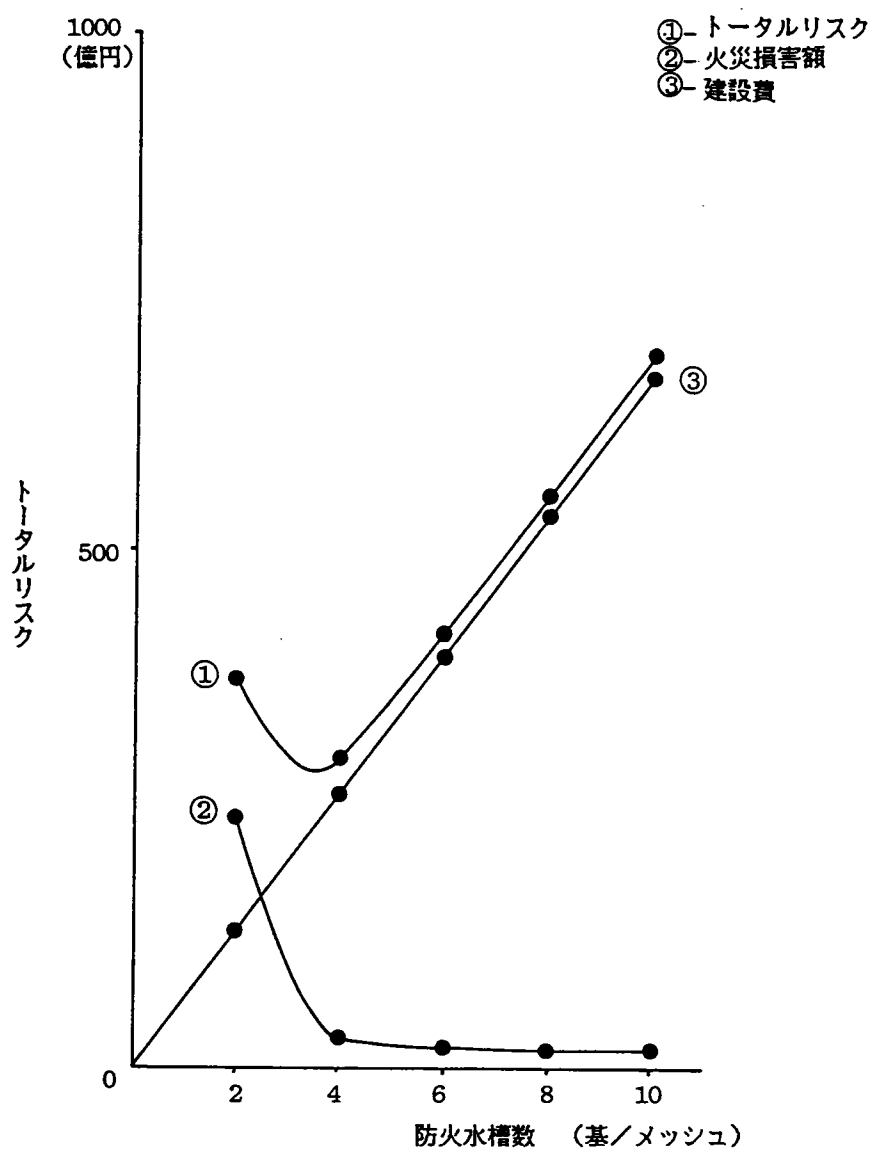


図 2-4-5 (g) トータルリスクと防火水槽数の関係
(社会的割引率8%、焼失単価10万円)

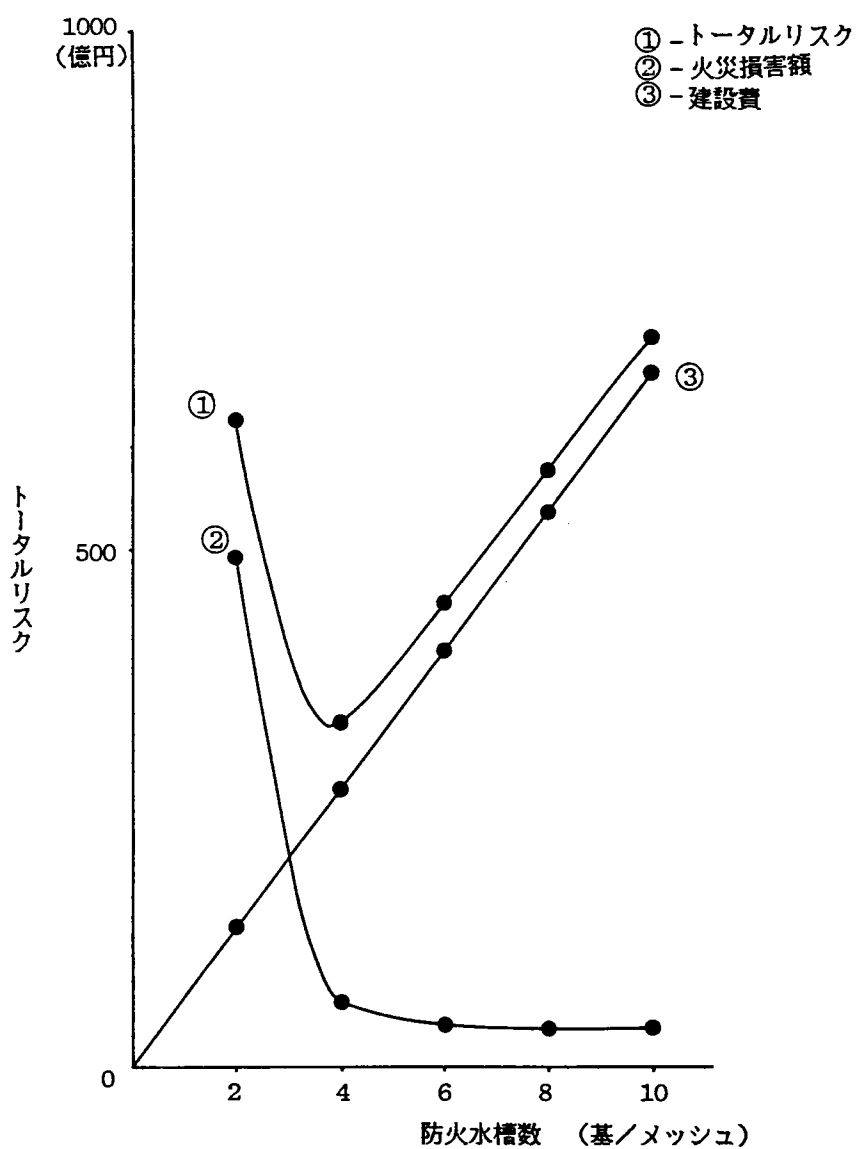


図 2-4-5 (h) トータルリスクと防火水槽数の関係
(社会的割引率8%、焼失単価20万円)

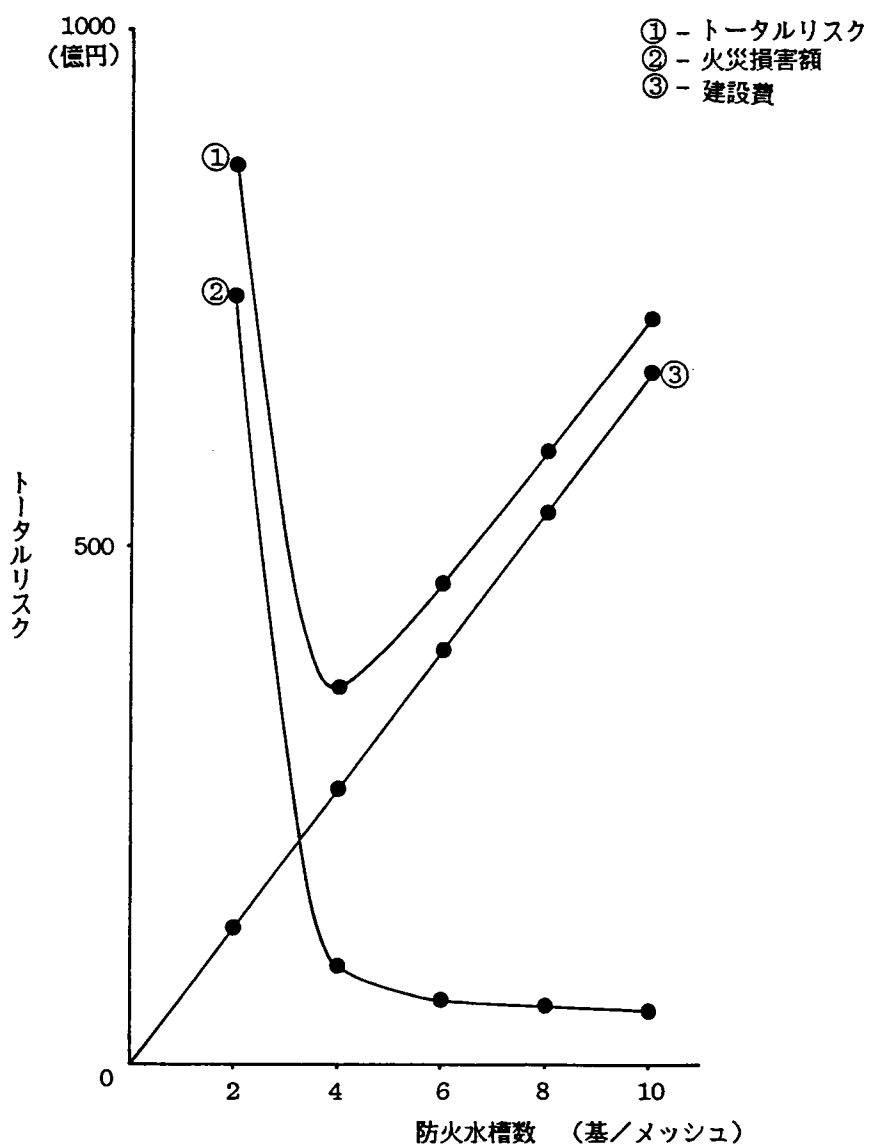


図 2-4-5 (i) トータルリスクと防火水槽数の関係
(社会的割引率8%、焼失単価30万円)

図 2-4-5における9通りの場合のトータルリスクが最小となる防火水槽数とそのときの火災リスクおよびトータルリスクを表 2-4-3に示す。防火水槽数は整数値であるので、約4基/メッシュ(15~16基/ km²)となる。この計算においては、防火水槽は100 m² のものを考えているが、40 m² のものを考えれば、その建設費はほぼ半額であるので、約8基/メッシュ(30~32基/ km²)となる。この40 m² 防火水槽は、メッシュ内の不特定の箇所より出火することを考慮すると、致密な配置を可能とする利点をもつが、反面その用地を確保することがかなり難しい。そのためもあって、東京都や大阪市では主として100 m² 防火水槽を整備している。

表 2-4-3 最適防火水槽数(100 m²水槽の場合)

<div>防火水槽・ トータルリスク</div> <div>項 目</div>		焼損単価10万円			焼損単価20万円			焼損単価30万円		
		社会的割引率%			社会的割引率%			社会的割引率%		
		6	7	8	6	7	8	6	7	8
最適 防火 水槽数	(基/km ²)	14.8	14.4	14.4	15.6	15.6	15.2	15.6	15.6	15.6
	(基/メッシュ)	3.7	3.6	3.6	3.9	3.9	3.8	3.9	3.9	3.9
トータルリスク (億円)		297	292	288	342	335	328	382	372	363

注) 40 m²の防火水槽の場合は、上表の値を2倍すればよい。

さて、4.1節で述べた東京都における100 m² 防火水槽の配置数は、250 mメッシュに1基であったので、これは500 mメッシュに直せば4基となり、ここで計算した値とほぼ同じ値である。ただし、その算定根拠は異なっており結果的に一致したものである。東京都の算定基準が、1つの防火水槽で250 mメッシュを覆うことができるとした、いわば十分条件であるのに対し、本章の算定モデルによる配置数は、経済的な側面から費用を最小にするための必要条件と言えよう。そして、双方の基準が計らずも一致したということは、大阪市または東京都と同等の都市においては、4基/500 mメッシュ(約16基/ km²)の100 m² 防火水槽を整備することが、必要かつ十分な対策と考えられる。

4.4 結言

本章では、第2編3で示した火災リスクの算定モデルを防火水槽の配置問題に応用した。その最適配置数に関して、大阪市を対象としたケーススタディを行なった結果、以下のことが判明した。

トータルリスクが最小となる防火水槽数は100m²を整備する場合には、4基/メッシュ（約16基/ km²）、40m²の場合には、8基/メッシュ（約32基/ km²）となった。

東京都における100m² 防火水槽の配置数は、250mメッシュに1基であったので、これは500mメッシュに直せば4基となり、ここで計算した値とほぼ同じ値であるが、この東京都の算定基準が、1つの防火水槽で250mメッシュを覆うことができるとした、いわば十分条件であるのに対し、本章の算定モデルによる配置数は、経済的な側面から費用を最小にするための必要条件である。大阪市または東京都と同等の都市においては、4基/500mメッシュ（約16基/ km²）の100m²防火水槽を整備することが、必要かつ十分な対策と考えられる。

以上が本章で得られた主たる成果であるが、以下のような点が問題点として残っている。

- ①火災リスクの算定に際し、メッシュ間の影響を考慮していない。
- ②本章では、防火水槽は等密度の配置（レイアウト）と仮定しており、建物状況等を考慮した空間的な最適配置を行なう方法について考慮することは、今後の研究課題としたい。

第5章 地震時火災を含む災害危険度を考慮した土地利用計画

5.1 緒言

前章では、都市の土地利用は現状のままで、消防力の強化によって地震時火災の被害を軽減させる方法について述べたが、家屋・施設等の集中度や平面的な配置パターンいわゆる土地利用形態によっても被害の様相は変わるものと考えられる。とくに、地震時の火災や家屋の倒壊は地震動すなわち地盤の良否に左右されるので、これらの被害を減少させるには木造建物の多い住宅地を地盤の堅固な地域へ移せばよいことが理解されよう。このように災害は立地する土地利用に左右されることが多い。地震災害に限らず、洪水による水害や土砂崩壊等も地形、地質等に大きく影響される。

ところで、わが国の都市は多くの場合、自然発生的に形成された歴史的経過の中で種々の建物用途が無秩序に立地してきた。したがって、上記のような災害に対して危険な地域も少なくなく、またスプロール現象や環境の悪化を招いてきたことは周知のとおりである。

このような都市の現状から、都市計画の目的とする「都市の健全な発展と秩序ある整備^{*}」を、さらに強力に押し進めていく必要があると思われる。このためには、各種の都市施設を整備、充実し、また災害や公害への対策を講じることが重要である。たとえば、災害時の避難施設としてまた日常の憩いの場あるいは公害に対する緩衝帯などとして機能する公園等を整備すること、あるいは前章において考察した防火水槽を始めとする消防施設等を充実することが挙げられる。また自然の営力に耐え得るように個々の建築物を耐震・耐火造にするなどの対策が恒久的な対策として挙げられる。

一方、観点を変えて、都市の有限な空間をより効果的に利用することを考えるならば、つぎのような方策も検討される余地があろう。すなわち、各種の土地利用用途を適正に再配置することによって、災害やその他の環境基準を満足する好ましい配置パターンを提示することができ、かつ費用その他の面で社会的合意を得ることができれば、地域全体をそのように改善することが可能と思われる。

従来の土地利用計画は、主として経済性、社会性、保健性の面から、地域のより良き環境を得る目的で立案されてきたが、本研究では、これらの面に加えて、自然災害に対する

^{*} 都市計画法第4条

安全性の面も考慮した土地利用計画モデルを提案し、より安全で、より良き地域環境を得るための方法論の検討を目的としている。

5. 2 土地利用と災害の関係

5.2.1 災害の種類と危険性評価

自然災害は、気象や地殻等の異常が誘因となって引き起こされる。災害の種類は、この論文で扱っている震災の他に、台風や豪雨による水害・土砂崩れ、竜巻等々の風害、雪害、渇水、火山爆発など数多い。災害の頻度や被害の程度は、地域によって異なるが、ここでは、わが国において最も発生しやすい土地に関連する自然災害、すなわち、地震時火災、水害および斜面崩壊について考察するものとする。これらの災害は、人命に直接危害を与える危険性の高いものであり、また比較的頻繁に全国各地で発生しているものである。その他の災害については、それほど頻繁でないか、人命に与える影響の少ないものであるので省略する。

ところで、災害危険性の程度を評価するには、各々の災害危険度を定量的に把握する必要がある。災害危険度は必ずしも定量的に表わされていないものもあり、また、本章の分析にとっては、それほど高精度の評価を必要としない。一般に、非計量のものや単位の異なるデジタル尺度で表わされている項目を評価するのに、段階評価法（3段階評価、5段階評価、10段階評価など）を用いることは有用である。本研究では、災害危険性の評価として、もっとも好ましくないものに5、もっとも好ましいものに1を与えることを基準に1から5までの序数（これを評点と呼ぶ）を与える5段階評価、およびもっとも好ましくないものに3、もっとも好ましいものに1を与える3段階評価を採用している。

この評点によって、災害の危険性を表わす指数をつぎのように定義し、危険率と呼ぶ。

$$r = \frac{R - \Delta R}{R_0} \quad (2-5-1)$$

ここに、 r : 危険率

R : 災害危険の評点

ΔR : 災害対策を施すことによる評点の減少分

R_0 : 許容評点

5.2.2 地震時火災の危険性

ここでは、土地利用状況が地震時火災危険度にどのような影響を与えるかについて考察する。この影響を把握するために、土地利用パターンを表 2-5-1のように設定した。表 2-5-1の土地利用パターンのモデル化に際し、大阪市のメッシュデータを参照して数値を与えたものである。用途別（住宅、工業および商業）の建物規模は、大阪市の各メッシュ（500mメッシュ）において、住宅、工業および商業の面積の割合が50%以上であれば、それぞれに対応する用途とし、1棟当たりの建築面積の平均値を求めた表 2-5-2から設定している。すなわち、表 2-5-2の値を丸めて、住宅60㎡、商業70㎡および工業90㎡とした。木造率は表 2-5-3のようであったが、各用途とも、25、50および75%の3段階で比べることにした。地盤は、S（Soft、軟らかい地盤）、I（Intermediate、中間の地盤）およびH（Hard、堅い地盤）の3種類である。したがって、用途3種類、木造率3種類および地盤3種類の合計27個の土地利用パターンを考えたことになる。なお、建物棟数は、大阪市の500mメッシュの平均値を参照して、住宅1000棟、商業 800棟および工業 600棟としている。また、消防活動は、前章で求めた最適な防火水槽数（1メッシュ当たり4基）が整備されるものとし、これから放水が行なわれることを前提としている。

以上を考慮して、本編第3章に基づいて地震時火災危険度を算出した結果を表 2-5-1の右欄に示している。これより、用途、木造率および地盤別にどの程度変化があるかを示したものが、表 2-5-4である。地盤が地震時火災危険度に大きく影響していることがわかる。S（軟らかい地盤）はH（堅い地盤）に比べて約5.8 倍も大きく、I（中間の地盤）とSを比較すれば約2.3 倍となっている。木造率については50%と25%の地震時火災危険度の比率が1.16、木造率75%と25%の比率が1.29となっており、木造率が増せば、危険度も増すことがわかる。用途別では3者の間にあまり差はみられないようである。ただし、この場合には木造率は各用途とも同じ条件として比較しているが、実際には表 2-5-3に示されるように、住宅地の木造率は高い。この点を考慮すれば、住宅地は商業地、工業地よりもやや危険度が大きくなるものと思われる。

以上のように、土地利用状況によって地震時火災危険度が変化することがわかった。とくに、地盤による影響が大きく、これを地震時火災危険度を評価する指標と考えることができよう。このことから、地震時火災の危険性を地盤の種類によって表 2-5-5のように設定する。なお、地震時火災の被害は地震時における直接的な家屋等の倒壊などの被害よりも大きくなると予測されるので、ここでは地震災害の代表的なものとして取り上げた。と

表 2-5-1 土地利用パターンの単純化および地震時火災危険度

土地利用パターン	建物の規模 (㎡/棟)	木造率 (%)	地盤の状態 * (S, I, H)	地震時火災危険度
住 宅①	60	25	S	0.0197875
" ②	60	25	I	0.0067445
" ③	60	25	H	0.0030696
" ④	60	50	S	0.0216773
" ⑤	60	50	I	0.0078077
" ⑥	60	50	H	0.0038560
" ⑦	60	75	S	0.0234866
" ⑧	60	75	I	0.0087896
" ⑨	60	75	H	0.0043878
商 業①	70	25	S	0.0199799
" ②	70	25	I	0.0068823
" ③	70	25	H	0.0030794
" ④	70	50	S	0.0217429
" ⑤	70	50	I	0.0078870
" ⑥	70	50	H	0.0038150
" ⑦	70	75	S	0.0234576
" ⑧	70	75	I	0.0088023
" ⑨	70	75	H	0.0043670
工 業①	90	25	S	0.0200634
" ②	90	25	I	0.0069550
" ③	90	25	H	0.0030865
" ④	90	50	S	0.0217610
" ⑤	90	50	I	0.0079333
" ⑥	90	50	H	0.0037953
" ⑦	90	75	S	0.0234182
" ⑧	90	75	I	0.0088097
" ⑨	90	75	H	0.0043505

* S (Soft, 軟い地盤)、I (Intermediate, 中間の地盤)、H (Hard, 堅い地盤)

表 2-5-2 建築面積の統計値

土地利用用途	平均値 (㎡/棟)	標準偏差
住宅	62.4	58.7
商業	71.9	28.8
工業	92.8	40.1

表 2-5-3 木造率の統計値

土地利用用途	平均値 (%)	標準偏差
住宅	64.0	18.9
商業	37.8	11.1
工業	43.4	15.7

表 2-5-4 各土地利用パターン別の地震時火災危険度の比率

木造率50% " 25%	住宅④ "①	住宅⑤ "②	住宅⑥ "③	商業④ "①	商業⑤ "②	商業⑥ "③	工業④ "①	工業⑤ "②	工業⑥ "③	平均値
	1.096	1.158	1.256	1.088	1.146	1.239	1.085	1.141	1.230	1.160
木造率75% " 25%	住宅⑦ "①	住宅⑧ "②	住宅⑨ "③	商業④ "①	商業⑤ "②	商業⑥ "③	工業④ "①	工業⑤ "②	工業⑥ "③	平均値
	1.187	1.303	1.429	1.174	1.279	1.418	1.167	1.267	1.410	1.293
地盤 S " I	住宅① "②	住宅④ "⑤	住宅⑦ "⑧	商業① "②	商業④ "⑤	商業⑦ "⑧	工業① "②	工業④ "⑤	工業⑦ "⑧	平均値
	2.934	2.776	2.672	2.903	2.776	2.672	2.885	2.743	2.658	2.257
地盤 S " H	住宅① "③	住宅④ "⑥	住宅⑦ "⑨	商業① "③	商業④ "⑥	商業⑦ "⑨	工業① "③	工業④ "⑥	工業⑦ "⑨	平均値
	6.446	5.622	5.353	6.488	5.699	5.372	6.500	5.734	5.383	5.844
商業住宅	商業① 住宅①	商業② 住宅②	商業③ 住宅③	商業④ 住宅④	商業⑤ 住宅⑤	商業⑥ 住宅⑥	商業⑦ 住宅⑦	商業⑧ 住宅⑧	商業⑨ 住宅⑨	平均値
	1.010	1.020	1.003	1.003	1.010	0.989	0.998	1.001	0.995	1.003
工業住宅	工業① 住宅①	工業② 住宅②	工業③ 住宅③	工業④ 住宅④	工業⑤ 住宅⑤	工業⑥ 住宅⑥	工業⑦ 住宅⑦	工業⑧ 住宅⑧	工業⑨ 住宅⑨	平均値
	1.014	1.031	1.005	1.004	1.016	0.984	0.997	1.002	0.992	1.005

ここで、地盤の状態をこの危険度の指標とすれば、家屋の倒壊等の危険性も同時に考慮しているものと解釈することができる。

77) 5.2.3 水害の危険性

かつて作成された名古屋地方の水害地形分類が、昭和34年に来襲した伊勢湾台風による水害範囲とその程度をよく予測していた。このように地形分類は、今後の水害の及ぶ潜在的危険地域を定性的に表現する優れた指標であるといえる。また、過去の水害履歴も地域の水害危険性を評価する有効な項目である。これは、地形分類による潜在的な水害危険地域を頻度や強度の点から定量的に補強する評価項目と考えられる。水害の危険性の評価基準は表 2-5-5のように示されている。文献78)に基づいて、これら2つの項目①地形分類、②過去の水害履歴の平均値をその土地の水害危険に関する評点とする。

5.2.4 斜面崩壊の危険性

斜面崩壊危険率は、自然斜面および人工斜面について、崩壊や地すべりなどの土塊運動の潜在的危険性を表すものである。これは表層風化土層の崩壊や基盤崩壊に対して、小地域の斜面単位のスケールで大きく関与している傾斜と、より広域のスケールで分布し関与している地質（岩石区分）および降雨量を加えて評価することができる。斜面崩壊の評

価基準は表 2-5-5に示されている。これら3つの項目①傾斜、②地質（岩石区分）および③降雨量について、文献78）に基づく加重平均（項目①～③に対して重みをそれぞれ、25、25、50とする）をその土地の斜面崩壊危険に関する評点とする。

表 2-5-5 各種災害の評価基準

評点		評 価 基 準				
区分		1	2	3	4	5
地震時火災	地盤のN値	30以上	10～30	10以下	——	——
	地形分類	山地、火山地丘陵、火山灰台地段丘、ローム層、シラス台地段丘、砂れき台地段丘、岩石台地、溶岩台地（溶岩流）	山麓地、火山山麓地、火山性扇状地、自然堤防砂州、砂れき州被覆砂丘	扇状地性低地、氾濫原性低地、自然堤防、砂州	三角州性低地、埋立地干拓地、埋立地および干拓地	湖沼、河川干潟
水害	洪水氾濫	（高潮・津波）海岸堤防防波堤による安全地域（河川洪水）洪水安全地域（内水氾濫）氾濫の記録がない		満潮時浸水地域洪水の記録がある100mm/日以上の降雨で湛水		湛水危険地域洪水常習地域100mm/日以下の降雨で湛水
斜面崩壊	傾斜	0°～15°	15°～20°	20°～25°	25°～35°	35°～90°
	岩石区分	けい岩質岩石、輝緑凝灰石、石灰岩、流紋岩質岩石、安山岩質岩石、斑岩質岩石	れき岩、凝灰岩質岩	れき、れきと砂、ローム黒色片岩緑色片岩その他の片岩	砂屑物、集塊岩、凝灰角れき岩、花こう岩質岩石、珪岩、圧砕岩	砂、泥、砂と粘土、れき砂、粘土、火山灰砂、火山破屑物軽石、シラス
	降雨量	日降雨100mm以上の頻度0～1回/年	1～2	2～3	3～4	4～5

5.3 土地利用計画モデル

5.3.1 従来の土地利用計画モデル

(1) 線形計画法および0-1混合整数計画法によるモデル

長尾らは、空港周辺の地域に対して環境評価を行なうために地域の人間・社会の取り得る行動は、改良、転換および移転のいずれか、またはその組み合わせとし、費用を最小とする基準によるモデルを提示している。⁷⁹⁾ここで、改良とは現在の土地利用形態を何ら変えることなく騒音対策等を施すことによって環境基準を満たすようにする方法、転換とは対象地域のみで土地利用の用途を転換して環境基準を満足させる方法、移転とは対象地域外への用途の移転による方法である。土地利用形態のあり方として、用途の混合利用を許す場合については、線形計画法で、用途の混合利用を許さない場合については、0-1混合整数計画法で定式化されている。モデルの仮定は以下のとおりである。

- ① 用途需要を一定とする。
- ② 道路、鉄道、空港、駅、ガス、電気、水道などの都市施設の配置パターンを与件とする。（ただし、学校、病院などの都市施設は住宅施設の付属施設とする。）
- ③ 容積率は、用途に関してのみ関係する量として与えられる。
- ④ 環境評価は互いに独立な環境評価項目により分類可能であり、しかも各環境評価項目の水準は順序づけが可能である。
- ⑤ 達成すべき環境基準を与件とする。
- ⑥ 対象地域は、改良、転換および移転のいずれかの組み合わせにより環境基準を達成する。
- ⑦ 用途の転換にともなう周囲への効果は無視できる。
- ⑧ 転換、または移転にともなう移送量は距離に関係しない。
- ⑨ 費用は占有面積に比例する。

なお、土地の評価項目としては、航空機騒音、道路騒音、大気汚染、鉄道利便性、道路利便性、地形および地盤の7項目を取り上げている。

(2) 目標計画法によるモデル

福村は、工場群周辺の整備計画について、目標計画法による土地利用モデルの定式化を行なっている。⁸⁰⁾すなわち、工場群の事故などによる危険性、大気汚染、騒音、振動、交通不便性に対して、各々の達成すべき環境基準値との差を優先順位に従って最小化するモデルである。モデルの仮定は以下のようである。

- ① 工場の規模はそれぞれ一定とする。
- ② 移転の範囲は対象地域のみとし、したがって総人口も一定である。
- ③ 公共施設の配置は一定とする。
- ④ 移転先への隣接地区には影響は及ばないものとする。

5.3.2 土地利用計画と目標計画法

前述のように、土地利用の再配置計画モデルには線形計画法、0-1混合整数計画法および目標計画法が応用されていた。土地利用形態の考え方として、あるゾーンの用途の混合利用を許すか許さないかで、それを表わす変数の性質により、線形計画法か0-1混合整数計画法かに決定される。この場合は、いずれも目的関数は1つである。一方、目標計画法は、線形計画法の修正であり、拡張であるが、複数の目的をもつシステムの最適解を与える。また、この手法は多重下位目標をもつ単一目標にかかわる意志決定問題だけでなく、多重下位目標をもつ多重目標からなる問題を取り扱うことができる。さらに、目標計画モデルの目的関数は、単一の単位でなくともよく、異質な測定単位により構成されうる。土地利用再配置計画においては、経済性、社会性、保健性などの多くの目的を持ち、さらにそれぞれの目的関数の測定単位は異質である。これらを考えれば、目標計画法は土地利用再配置計画の定式化に、正に適当な手法であると思われる。ただし、用途の混合利用を許す場合についてのモデル化に適しており、混合利用を許さない場合については、0-1目標計画法とすべきであろうが、その解法は現段階においては開発されていない状況である。

目標計画法の解法には、図式解法、シンプレックス法および一般逆行列法などがある。^{81),82),83)}
^{84),85),86)}
 また、アルゴリズムの改良手法としては、L字型効用関数を用いて解く方法などがある。

本研究では、目標計画法による定式化を行なうが、土地利用計画の基礎的な検討を行ない、その方法論について示すものである。目標計画法の基本的な、順位づけ、加重によるシンプレックス法により解くものとする。

5.4 計画の前提条件

5.4.1 ゾーニングと土地利用形態

分析の要素としては、対象地域を適当なメッシュに分割した矩形ゾーンとする。分析を行なう上で、メッシュの大きさの選び方に問題があるが、本研究ではつぎの条件が満足さ

れていることを必要とした。

- ① 各メッシュは独立した用途を代表できる大きさであること。
- ② 土地の評価項目の水準値がゾーン内で均一性を保てる大きさであること。
- ③ 計算の実用性に十分耐える大きさであること。

つぎに、ゾーン内の土地利用形態は、混合利用を許す場合と許さない場合との2つが考えられる。本研究における分析手法の制限により、混合利用を許す場合についてのみ取り扱わざるを得ない。前述のように、混合利用を許さない場合を分析するには、0－1目標計画法を開発する必要がある。

5.4.2 環境評価項目

環境評価項目は、地域の自然災害の危険性、交通条件および公害条件を考慮して、地震時火災、水害、斜面崩壊、最寄鉄道駅までの距離および大気汚染の合計5項目とした。また、政策については、改良、転換および移転の3種類とした。以下にこれらの説明を列記する。

- ① 自然災害の危険性については、地震時火災、水害および斜面崩壊の3項目について評価するものとする。前述のように、これらの評価基準は表 2-5-5のようである。
- ② 利便性（交通条件）の代表的なものとして、最寄鉄道駅までの距離を評価項目として取り上げ、表 2-5-6のように評価基準を設けている。
- ③ 保健性（公害条件）から大気汚染を考え、その評価基準を表 2-5-6のようにを設けている。

表 2-5-6 利便性および保健性の評価基準

評点		評 価 基 準				
項目		1	2	3	4	5
交通利便性	最寄鉄道駅までの距離	500 m 未満	500 ~1000 m	1000 ~1500 m	1500 m ~2000 m	2000 m 以上
大気汚染	NO _x 濃度	0.04ppm 未満	0.04 ~0.06 ppm	0.06ppm 以上	——	——

- ④ 各メッシュにおいて、環境基準を満足しない項目については、改良、転換および移転のいずれかを行ない、環境基準を満足させるものとする。ここで、改良とは現在の土地利用形態を何ら変えることなく、地盤改良、斜面安定工法などを施すこと、転換とは対象地区内のみで土地利用の用途を転換すること、移転とは対象地域外への用途の移転である。

5.5 モデルの定式化

5.5.1 変数の定義と目標制約条件の定式化

(1) 変数の定義

まず、分析の単位として地域を等間隔に J 個のメッシュに分割し、ある j 番目の地区を j メッシュと呼ぶ。また、土地利用用途を表わす記号を k とし、その種類の合計を K 個（以下のケーススタディでは、 $K=4$ であり、 $k=1$ は住宅、2 は工業、3 は商業、4 は緑地を表わす。）、環境の評価項目を表わす記号を m とし、その種類の合計を M 個（以下のケーススタディでは、 $M=5$ であり、 $m=1$ は地震時火災危険、2 は水害危険、3 は斜面崩壊危険、4 は大気汚染、5 は交通利便性を表わす。）とする。以下にモデルの定式化に必要な諸量の定義をする。

A_j : j メッシュの利用可能面積（ j メッシュの全面積から河川、湖沼、鉄道、公共施設などの面積を除いた面積）

κ_{kj} : j メッシュの k 用途の占める面積の割合

κ_{kj}^0 : 現況における j メッシュの k 用途の占める面積の割合

${}^mS_k^*$: k 用途の環境項目 m の単位面積当たりの許容評点

mS_j : j メッシュの環境項目 m の単位面積当たりの評点

$\Delta {}^mS_j$: j メッシュの環境項目 m の改良による単位面積当たりの評点減少分

(2) 環境に関する目標制約条件式

いま、 j メッシュにおける k 用途の環境項目 m に関する評価値は、 k 用途の面積が $A_j \kappa_{kj}$ であるから、改良を行なうものとするれば、つぎのように表わされる。

$$({}^mS_j - \Delta {}^mS_j) A_j \cdot \kappa_{kj} \quad [j=1, 2, \dots, J; k=1, 2, \dots, K; m=1, 2, \dots, M] \quad (2-5-2)$$

一方、環境の許容値は、全地域においては現在の k 用途が占める面積が $\sum A_j \cdot \kappa_{kj}^0$ であ

るから、 ${}^m_k S^* \cdot \Sigma A_J \cdot {}_k X_J^0$ となる。用途の需要を計画の前後で一定とすれば、この値は全体としては変わらない。この地域全体の許容値を各メッシュに受けもたせるものとすれば J メッシュにおける k 用途の環境項目 m についての許容値は、つぎのようである。

$${}^m_k S^* \cdot (\Sigma A_J \cdot {}_k X_J^0) \frac{A_J}{\Sigma A_J} \quad (2-5-3)$$

さて、式 (2-5-2) をできるだけ式 (2-5-3) に近づけるような ${}_k X_J$ を求めようとするのが目標計画法の考え方である。すなわち

$$({}^m S_J - \Delta {}^m S_J) A_J \cdot {}_k X_J \rightarrow {}^m_k S^* \cdot (\Sigma A_J \cdot {}_k X_J^0) \frac{A_J}{\Sigma A_J} \quad (2-5-4)$$

両辺を ${}^m_k S^* A_J$ で割れば

$$\frac{({}^m S_J - \Delta {}^m S_J)}{{}^m_k S^*} \cdot {}_k X_J \rightarrow \frac{\Sigma A_J \cdot {}_k X_J^0}{\Sigma A_J} \quad (2-5-5)$$

となる。ここで

$${}^m_{kZJ} = \frac{{}^m S_J - \Delta {}^m S_J}{{}^m_k S^*} \quad (2-5-6)$$

とおけば、これは式 (2-5-1) で定義した危険率である。ここで、 ${}^m_{kZJ}$ の性質を調べてみれば、 ${}^m_{kZJ} \leq 1$ のときは許容値を満足しているので、このようなメッシュでは、 ${}_k X_J$ を $\Sigma A_J \cdot {}_k X_J^0 / \Sigma A_J$ 以上の占有率とするように k 用途を立地させるようにする。また、 ${}^m_{kZJ} > 1$ のメッシュは許容値を満たしていないので、住宅、商業または工業は立地させないようにするべきであることがわかる。

さて、式 (2-5-5) は

$${}^m_{kZJ} \cdot {}_k X_J \rightarrow \frac{\Sigma A_J \cdot {}_k X_J^0}{\Sigma A_J} \quad (2-5-7)$$

となる。式 (2-5-7) をすべてのメッシュについて総和して目標制約条件式とすればつぎのようになる。

$$\sum_j {}^m_{kZJ} \cdot {}_k X_J + {}_k d_m^- - {}_k d_m^+ = \frac{J \Sigma A_J \cdot {}_k X_J^0}{\Sigma A_J} \quad (2-5-8)$$

ここに、 ${}_k d_m^-$: 不足差異変数 (${}_k d_m^- \geq 0$)

${}_k d_m^+$: 超過差異変数 (${}_k d_m^+ \geq 0$)

(3) 費用に関する目標制約条件式

費用の種類として、つぎの3つを考える。

${}_k C_j^-$: jメッシュをk用途が全部占めたときの改良費用

${}_k C_j^0$: jメッシュを全部k用途に転換したときの転換費用

${}_k C^0$: 移転代替地全部をk用途が占有したときの移転費用

以上の記号を用いて全メッシュ、全用途における目標制約条件式はつぎのようになる。

$$\sum_j \sum_k {}_k C_j^- {}_k X_{j(1)} + \sum_j \sum_k {}_k C_j^0 {}_k X_{j(2)} + \sum_k {}_k C^0 {}_k W + d^- - d^+ = C_0 \quad (2-5-9)$$

さらに、 ${}_k X_{j(1)} = {}_k X_{j(1)} + {}_k X_{j(2)}$ となることを考慮して

$$\sum_j \sum_k {}_k C_j^- {}_k X_{j(1)} + \sum_j \sum_k ({}_k C_j^- + {}_k C_j^0) {}_k X_{j(2)} + \sum_k {}_k C^0 {}_k W + d^- - d^+ = C_0 \quad (2-5-10)$$

ここに、 C_0 : 投入可能費用

${}_k W$: k用途の移転代替地における占有率

${}_k X_{j(2)}$: jメッシュのk用途の面積が現況を越える部分の面積占有率。

${}_k X_{j(1)}$: jメッシュのk用途の面積が現況を越えない場合の面積占有率。

${}_k X_j$: jメッシュのk用途の任意の面積占有率。

① 現況を越える面積で立地するとき

$${}_k X_j = {}_k X_{j(1)} + {}_k X_{j(2)} \text{ただし、} {}_k X_{j(1)} = {}_k X_j^0$$

② 現況以下の面積で立地するとき

$${}_k X_j = {}_k X_{j(1)} + {}_k X_{j(2)} \text{ただし、} {}_k X_{j(2)} = 0$$

d^- : 不足差異変数 ($d^- \geq 0$)

d^+ : 超過差異変数 ($d^+ \geq 0$)

5.5.2 目的関数

前節までの目標制約条件式は、不利益で評価されているので、目標からの超過分の差異変数 d_n^+ ($n=1,2,\dots,N$)をできるだけ小さくしたい。したがって、目的関数は順位係数 P_n との積の和で表わして

$$Z = \sum_{n=1}^N P_n \cdot d_n^+ \rightarrow \text{最小化} \quad (2-5-11)$$

とすればよい。ここで、 N は目標順位の総数である。 d_n^+ は目標順位 n の目標制約条件式[式(2-5-8)および式(2-5-10)]の差異変数 ${}_k d_n^+$ または d_n^+ を示す。

制約条件としては、式(2-5-8)および式(2-5-10)のほかに、つぎのものが考慮されなければならない。

$$\begin{aligned} 0 &\leq \sum_k ({}_k X_{j(1)} + {}_k X_{j(2)}) \leq 1 & (j=1, 2, \dots, J) \\ 0 &\leq {}_k X_{j(1)} \leq {}_k X_j^0 & (k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, J) \\ 0 &\leq {}_k X_{j(2)} \leq 1 - {}_k X_j^0 & (k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, J) \\ \sum_j A_j \cdot {}_k X_{j(1)} + A_j \cdot {}_k X_{j(2)} &\geq D_k & (k=1, 2, \dots, K) \end{aligned}$$

ここに、 A_j : 移転代替地の全面積

D_k : k 用途の需要面積

5.5.3 モデルの仮定

モデルの定式化に際して仮定したことを、もう一度整理し列記すれば以下のとおりである。

- ① 用途需要を一定とする。
- ② 道路、鉄道、駅、ガス、電気、水道などの都市施設の配置パターンを与件とする。
(ただし、学校、病院などの都市施設は住宅施設の付属施設とする。)
- ③ 環境評価は互いに独立な環境評価項目により分類可能であり、しかも各環境評価項目の水準は順序づけが可能である。
- ④ 災害危険性をはじめとする達成すべき環境評価基準を与件とする。
- ⑤ 対象地域は、改良、転換および移転のいずれかの組み合わせにより環境基準を達成する。
- ⑥ 用途の転換にともなう周囲への効果は無視できる。
- ⑦ 転換、または移転にともなう移送量は距離に関係しない。
- ⑧ 費用は占有面積に比例する。

5.6 適用例と考察

適用例の対象地域としては、大阪府北東部に位置する枚方市である。この地域周辺は、

大阪市の衛星都市として近年、人口増加を続けており、市街地が東の生駒山系に向って広がっている。また、西方は淀川流域の沖積平野であり、軟弱な地盤となっている。この地域のゾーニングは、国土数値情報整備事業で用いられている基準メッシュ（1メッシュ約106.4ha〔約1km×約1km〕）を利用した。

対象地域の概略およびそのゾーニングを図 2-5-1に、各メッシュにおける土地利用用途の現況および各環境評価項目の評点を図 2-5-2に示す。また、用途別占有面積の現況を表 2-5-8に示すが、各用途とも需要はそのまま変わらないものとして土地利用の再編を行なう。環境評価項目は、前述のように災害に関する危険項目として、地震時火災、水害および斜面崩壊の危険の3つを取り上げ、さらに交通条件として最寄鉄道駅までの距離、公害条件として大気汚染の計5項目を採用した。本研究での対象地域の各用途について設定したこれらの環境評価項目の許容評点は表 2-5-7のようである。この許容評点は、まず、災害の危険性や環境の不便益はできるだけ避けることを考えて、5段階評価の場合は3、3段階評価の場合は2を基準としている。さらに、より良い環境を望むならば、2または1を目標とすることを考えればよいが、ここで対象とした地域のような場合には、このような値を満足するメッシュは少なく、これを満足するには、多くの改良費用や移転費用を必要とし現実的でなくなる。また、この研究は、主として土地利用計画の方法論に重きを置いており、許容評点は表 2-5-7の場合のみについてのケーススタディにとどめる。

費用については、参考文献 79)で用いられた値を引用し、表 2-5-9のように定めている。

以上のデータをもとに、目標計画法による土地利用の再編を行なう場合の順位係数は、まず住宅地の安全を第一に考えてつぎのようにした。

順位1：住宅地の地震時火災、水害および斜面崩壊の目標を達成すること。

順位2：工業地、商業地の地震時火災、水害および斜面崩壊の目標を達成すること。

順位3：住宅地、工業地、商業地の交通不便性および大気汚染の目標を達成すること。

順位4：緑地の地震時火災、水害、斜面崩壊、交通不便性および大気汚染の目標を達成すること。

順位5：費用の超過分を最小化すること。

以上のように計算して土地利用を再編した結果を図 2-5-3に示す。図 2-5-3によれば、住宅地は現況とほぼ同じような範囲、すなわち鉄道沿線に多く立地している。工業地は市の東部に分布している。商業地は西部に集中している。緑地は主に東部の山地部分および淀川沿岸である。全体的な特徴としては、住宅、工業および商業とも現況に比べて、立地

しているメッシュ内の用途が単一利用に近づいていることがわかる。用途の純化傾向を示すような再編となるのは表 2-5-7に示した住宅用途の許容評点を満足できるメッシュ数が

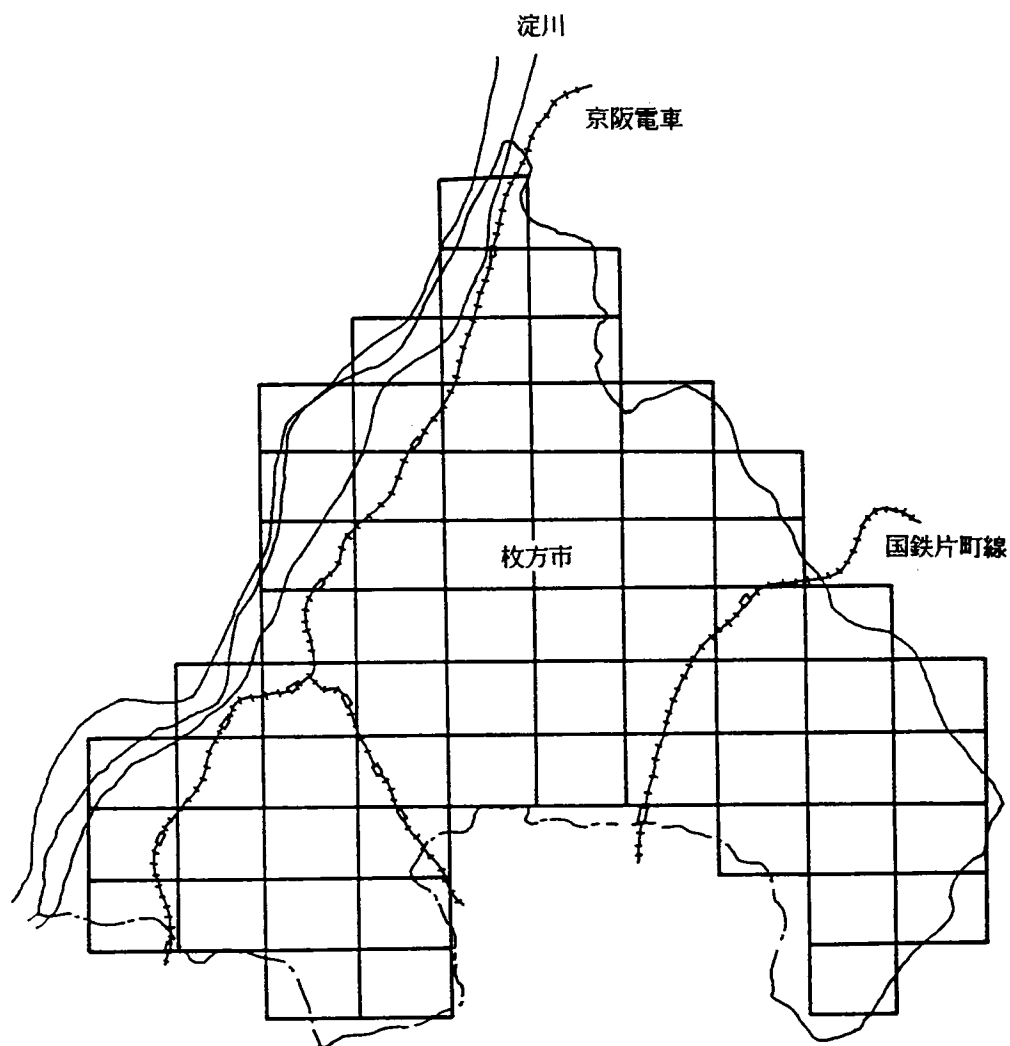


図 2-5-1 対象地域とそのゾーニング

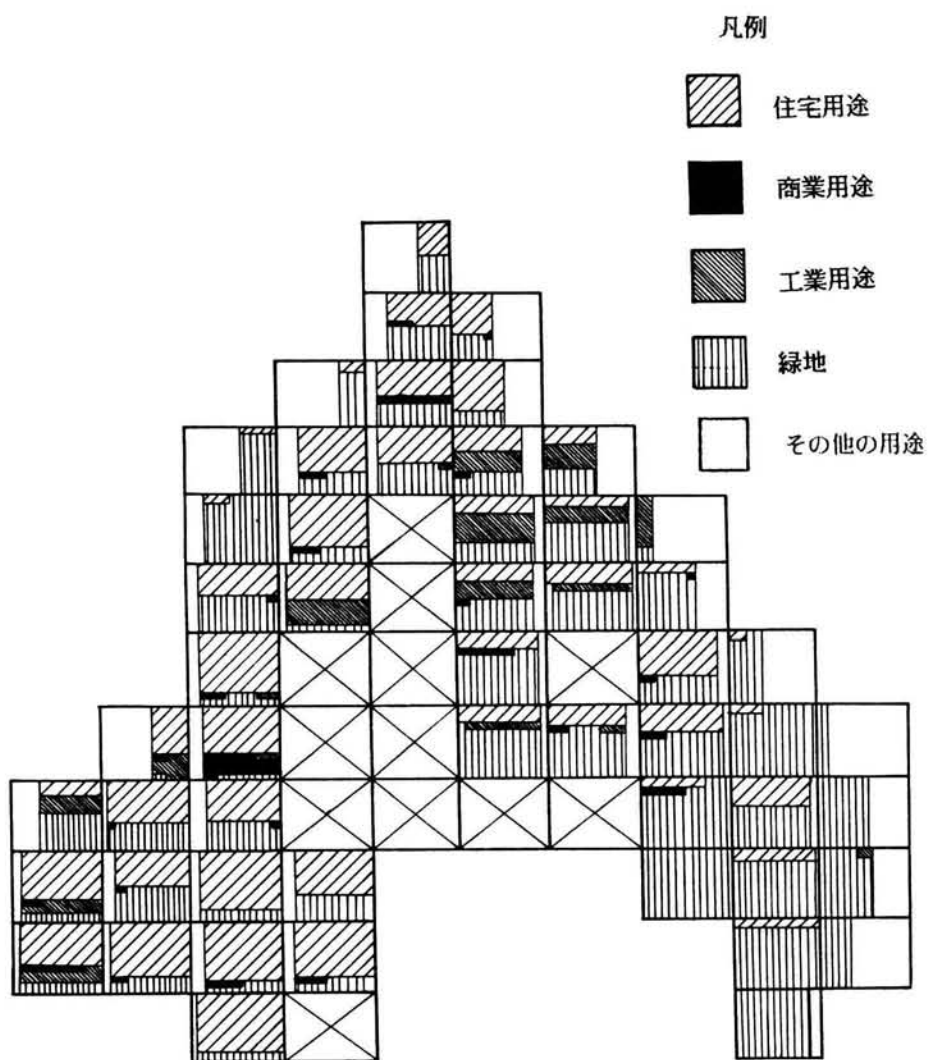


図 2-5-2 対象地区の現況 (a) 各メッシュにおける土地利用

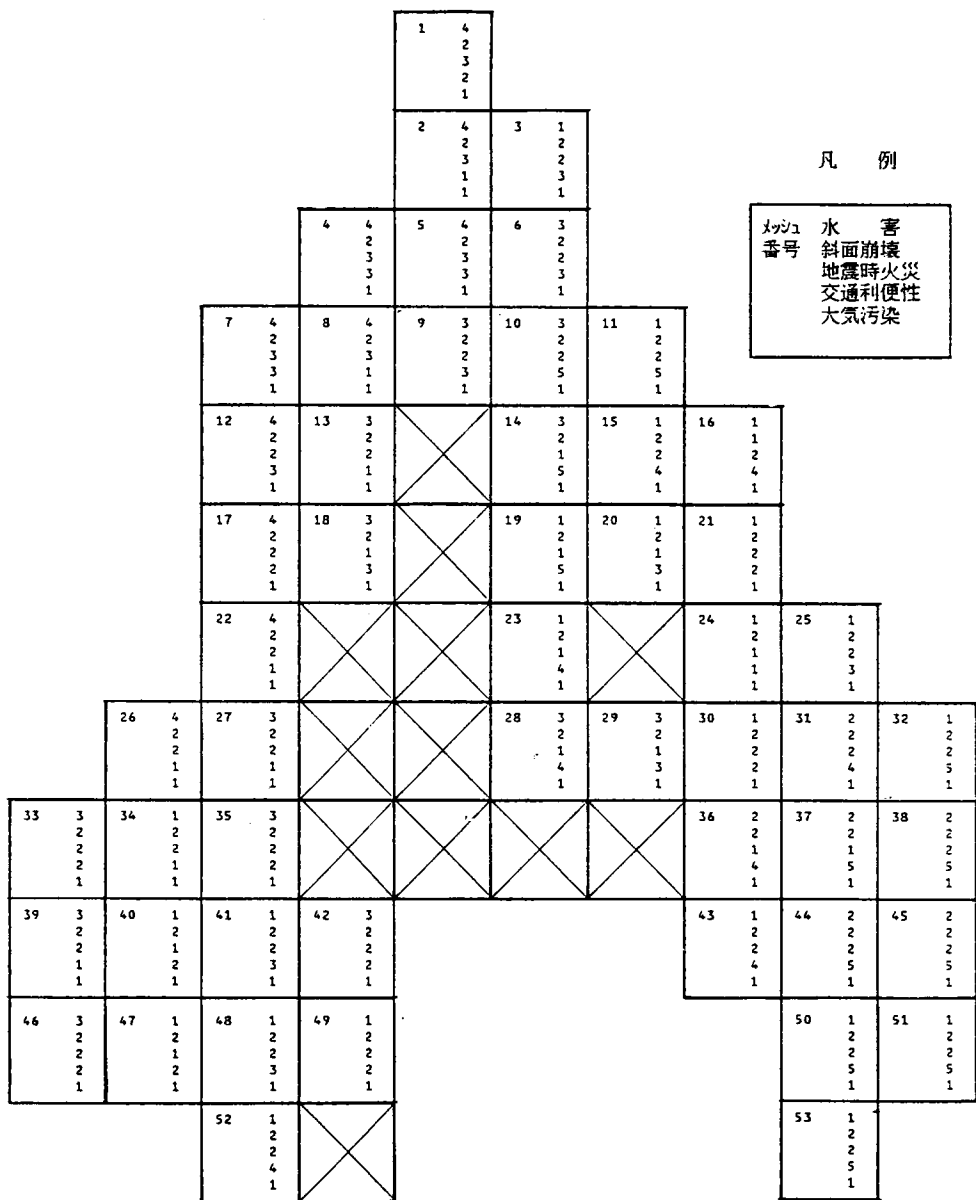


図 2-5-2 対象地区の現況 (b) 各メッシュにおける各環境評価項目の評点

表 2-5-7 用途別評価項目の評点の許容値と評価項目別の減少分

項 目 用 途	住 宅	工 業	商 業	緑 地	Δ
地震時火災	2	2	2	3	1
水 害	3	3	3	5	∞
斜面崩壊	3	3	3	5	∞
交通利便性	3	4	2	5	∞
大気汚染	2	2	2	3	∞

(注) Δは、改良により可能な評点の減少分を示す。∞は、改良不可能を示す。

表 2-5-8 対象地域での用途別占有率

項 目 用 途	住 宅	工 業	商 業	緑 地
占 有 率	0.387	0.068	0.021	0.524

23と限定されているためと考えられる。

また、用途の移転は住宅のみで起こり、移転量は対象地域全体の利用可能面積の約 2.2×10^5 倍、面積で、約 0.12 haであった。

なお、順位1～順位4までの目標は完全に達成されている。したがって、順位1～4までを、入れ替えても結果は変わらない。結果に影響のあるのは、上記の順位5であり、この費用の超過分を最小化する目標を最優先した場合を図 2-5-4に示す。この場合には、現況の土地利用に近くなっていることがわかるが、当然環境の目標の達成度が小さくなっている。また、費用の制約のため再編後の商業用途の面積が現況面積よりも小さくなっている。

表 2-5-9 費用⁷⁹⁾

(a) 改良費用

項 目	費 用	単 価 (万円/㎡)	単 価 (億円/メッシュ)
地盤・地質		0.8	85.1

(b) 転換費用

用 途	費 用	撤 去 整地費*	移送費*	建築費*	買収費*
住 宅		0.8	0.8	8.0	0
工 業		0.8	1.0	10.0	0
商 業		0.8	0.7	7.0	0
緑 地		0.15	0	0.3	0

* 単位：万円/㎡

(c) 移転費用

用 途	費 用	撤 去 整地費*	移送費*	建築費*	買収費*
住 宅		0.8	0.8	8.0	8.0
工 業		0.8	1.0	10.0	8.0
商 業		0.8	0.7	7.0	8.0
緑 地		0.15	0	0.3	8.0

* 単位：万円/㎡

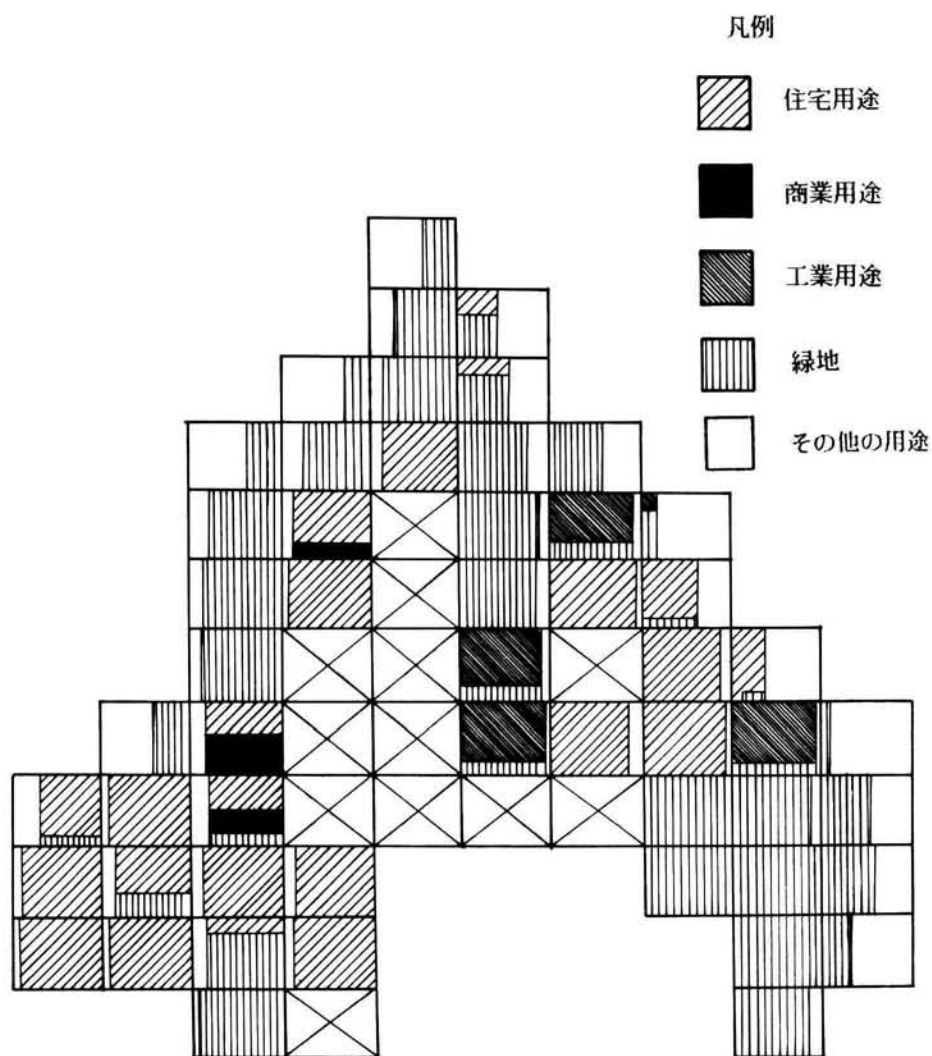


図 2-5-3 モデルによる土地利用再編結果
（ケース1：環境の目標達成を優先した場合）

注）図中の記号の大きさは、各用途の占める面積を示す。（1メッシュ＝106.4ha）
空白は、土地利用不可能の部分を示す。

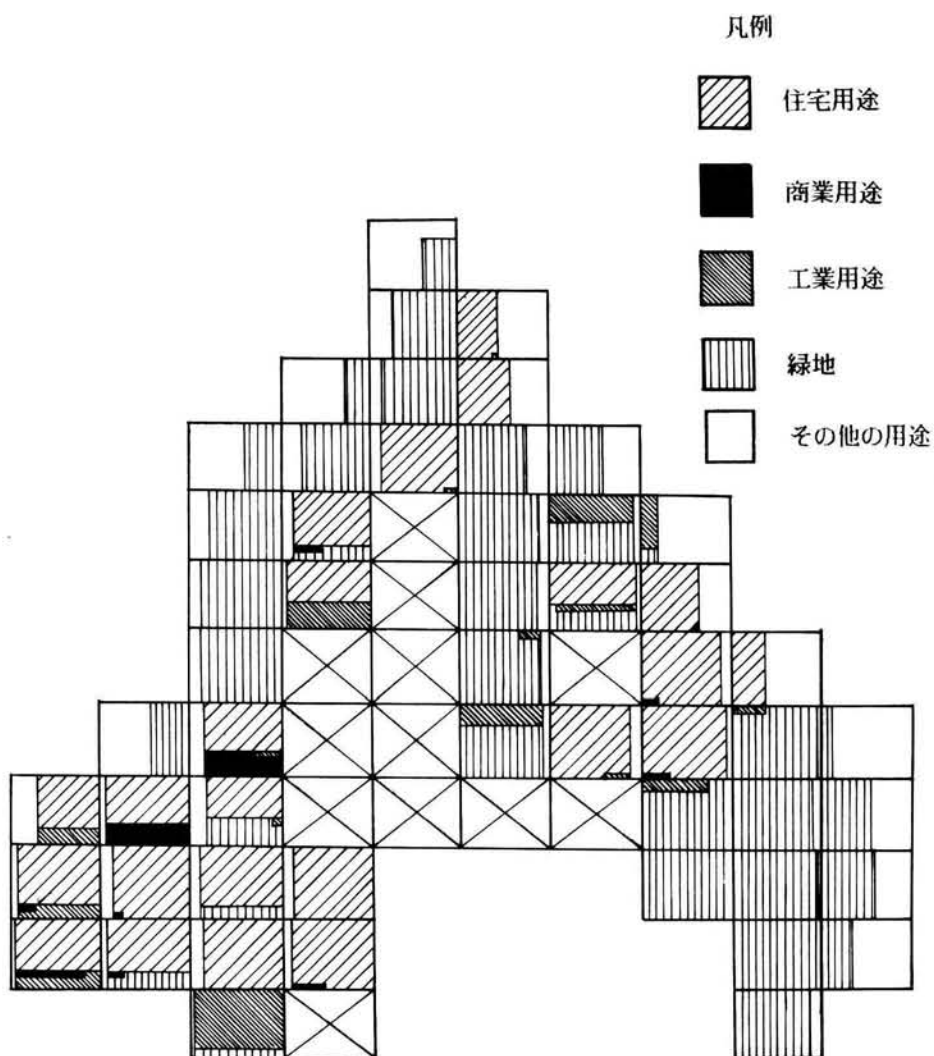


図 2-5-4 モデルによる土地利用再編結果
(ケース2：費用最小の目標達成を優先した場合)

注) 図中の記号の大きさは、各用途の占める面積を示す。(1メッシュ=106.4ha)
空白は、土地利用不可能の部分を示す。

5. 7 結言

以上、主な成果をまとめるとつぎのようである。

- (1) 災害の危険性をはじめとする各環境項目の評価値とその許容値の差をできる限り小さくしようという観点から、目標計画法によるモデルによって得られた土地利用再配置計画の方法論を示した。
- (2) この土地利用再配置計画モデルによるケーススタディを通じて、地域全体として好ましい土地利用計画案が得られることが判明した。
- (3) 従来の土地利用の再配置計画は、直感的な図形的表現で行なわれていたが、これを客観的に表現する基礎を確立した。

つぎに、今後の課題を列举するとつぎのようである。

- (1) ゾーン相互間の隣接効果を同時に満足したモデルを開発すること。また、ゾーニングの大きさによる解の安定性を考慮すること。
- (2) 公共施設の配置と用途の配置を同時に決定するモデルを開発すること。
- (3) 災害危険やその他の環境評価の精度を向上させることならびにこれらの項目を精選すること。
- (4) 用途の混合利用を許さない場合のモデル化として、0-1目標計画法の開発をすること。
- (5) 静学的な本モデルから、地域の形態変化を表わすように動学的なモデルに拡張していくこと。

などが挙げられる。

第6章 結論

本編では、地震時防災計画のための方法論を提示するとともに、都市防災施設および土地利用計画について、事例研究を行ない、その妥当性および有効性を示した。各章で得られた成果を結論的に、述べると以下のとおりである。

第2章では、意志決定理論における決定樹木分析の手法を応用することにより、地震時火災に限定した防災計画の1つとして、耐震防火水槽を整備して消防力を強化する場合における最適な防火水槽数を求めるための定式化が可能となることを明らかにした。また、防災施設の整備によって、トータルリスクが減少することのほかに、土地利用の整備によっても、これが減少することを示し、土地利用の適切な再配置を行なうことは被害軽減対策となりうることを示した。

第3章では、地震時火災によるリスクおよび地震時火災危険度を定義し、従来の研究と比較検討した。従来のC.Scawthorn による地震時火災危険度の予測手法は、地震の被害を確率・統計的に研究した優れたものであり、その概要を示した。この特徴は、火災の延焼に関しては、浜田・堀内の式を用いて、焼失戸数を求めるものであるが、延焼阻止に関しては全くの仮定をしている。そこで、筆者は第1編の延焼阻止モデルを、地震時火災危険度の予測モデルに組み入れて、C.Scawthorn の手法を発展させ、新たに地震時火災危険度および地震時火災によるリスクを定義した。これにより、消防力の効果を考慮した実際の地震時火災の被害が予測できることを示した。

第4章では、防火水槽数の最適水準を大阪市を対象としたケーススタディを行なった結果、トータルリスクが最小となる防火水槽数は100m²の場合は4基/メッシュ（約16基/km²）、40m²の場合は8基/メッシュ（約32基/km²）となった。これは、東京都における設置基準と同じとなったが、この東京都の算定基準が、1つの防火水槽でメッシュを覆うことができるとした、いわば十分条件であるのに対し、本章の算定モデルによる配置数は、経済的な側面から費用を最小にするための必要条件である。大阪市または東京都と同等の都市においては、4基/500mメッシュ（約16基/km²）の100m²防火水槽を整備することが、必要かつ十分な対策と考えら、この設置基準により防火水槽を整備することの重要性を指摘した。

第5章では、災害の危険性をはじめとする各環境項目の評価値とその許容値の差をできる限り小さくしようという観点から、目標計画法によるモデルによって得られた土地利用

計画の方法論を示した。従来の多くの土地利用の再配置計画は、直感的な図形的表現で行なわれていたが、これを客観的に表現する基礎を確立したといえる。また、この土地利用計画モデルによるケーススタディを通じて、地域全体として好ましい土地利用計画案が得られることが判明した。これは、環境の目標、費用の制限をできるだけ満足した現実性のあるものとなっており、さらに、地区内の用途が純化させる傾向を示すことは、土地利用計画にとって、好ましい結果になっている、などが明らかにされた。

以上が、本編で得られた主要な結論であるが、今後に残された課題として

- (1) 本編で定式化した地震時防災計画は、主として火災を中心としたものであるが、構造物の倒壊、地盤の液状化等を考慮した総合防災計画に発展させること。
 - (2) 都市全体として、地震時における既存の消防施設等の信頼性がどの程度あるのかについては、あまり明確でなく、これらを科学的に解明すること。
 - (3) 本編の土地利用計画モデルを実際の都市に適用するためには、環境評価項目をさらに精選し、またその許容値について検討すること、ならびに対象地区の特性等を考慮すること。また、目標計画法の解法に関しては各目標間のバランスの良い解が得られるアルゴリズムを適用、開発すること、および目標計画法以外の手法によるモデルを開発すること。
- などが挙げられる。

結 論

結 論

この研究は、序論でも述べたように、都市防火対策の一環としての耐震防災計画を定式化する一般的方法論を確立することを目的とし、その主な内容としては、①市街地火災の被害を最小限に止めるための手段をさぐる基礎としての火災の延焼機構の分析を行ない、②それを基に防火施設の整備による被害軽減対策を検討し、さらに、③土地利用の変更計画に関して検討を行ない、より合理的な計画手法について論じたものである。第1編においては、都市防災計画のための火災延焼に関する基礎的な理論についての研究成果を述べるとともに、各種の考察を加えた。すなわち、火災の現況および防火対策を概観し、問題点を把握した後、火災の被害を最小限に止める手段をさぐるための基礎としての火災延焼機構の分析を行なった。すなわち、実家屋群の火災実験および実際の火災資料から新しく火災延焼モデルを定式化し、さらに放水量および放水開始時間が延焼阻止にどのように効果を及ぼすかという解析結果を述べ、火災延焼阻止モデルに関する研究結果について論述した。各章の要点を結論的に述べるとつぎの通りである。

第2章では、火災は平常時においても地震時においても発生することが予想されるので、多くの住民はこれに不安を示しており、消防力の強化という面からその被害を軽減させる対策を行なうことは重要な課題であることを指摘した。これが、本研究における火災の延焼機構を分析し、できる限り火災の被害を抑えるための基礎を確立しようとする研究の背景である。また、消防力は平常時の火災に対しては、かなりの充足率になっていることがわかったが、消防水利の放水能力や配置密度および耐震性については必ずしも満足されていない。地震時には、上水道等の都市供給施設は至る所寸断し、これに付設されている消火栓は使用できなくなることが予想されるが、耐震性の防火水槽はあまり整備されていない状況である。恒久的な対策としては、上水道のバイブラインの耐震性を向上させて、消火用水および生活用水を確保する対策も必要であると思われるが、これを達成するには、莫大な費用と時間を必要とし、すでに研究開発されて実用的な耐震性の防火水槽等の整備を平行して進めていくべきものと考えられる。この地震時の防災施設整備に関する問題点により、第2編における研究が必要となることを指摘した。

第3章では、実大家屋火災実験および火災資料を分析し、建物火災のより合理的な新しい延焼モデルを提案した。すなわち、従来の大部分の延焼モデルは大火のデータを基にしており、したがって出火後約1時間もしくはそれ以上の延焼状況（無限の可燃物が存在す

る場合)に重点が置かれているので、比較的小規模な通常の火災の延焼状況については必ずしもうまく説明できない。そこで、1棟または数棟が延焼する火災(有限の可燃物がある場合)に対して新しい延焼モデル式としてロスティック曲線[式(1-3-42)]を採用すると比較的うまく説明することができた。このロスティック曲線を用いて表わした延焼モデルは、火災の出火から鎮圧までの延焼状況をかなりよく表わしており、従来の式はこの延焼モデル式(ロスティック曲線)の変曲点まで、あるいは変曲点を連ねた線と同等のものであることがわかった。また、K市およびS市における延焼モデル式(ロスティック曲線)の係数 a および c を検討することにより、これらは風速 v および建物群の建築面積 G の関数として表わさることを明らかにした。

第4章では、消防活動における放水量および放水開始時間の延焼阻止効果を定式化した。すなわち、消火放水量 Q の状況に応じた放水開始後の時刻 t の焼失面積 $A(t)$ は、式(1-4-14)および式(1-4-15)より求めることができることを示した。すなわち、このモデルにより建物の焼失面積と放水量および放水開始時間との関係が明らかとなったので、所与の放水量と放水開始時間に対して、放水効果の影響を受ける刻々の焼失面積を推定できるようになった。そして、この延焼阻止モデルを都市の火災の焼失面積の予測に適用した結果、予測値と実際値はよく合い、モデルの妥当性が検証された。したがって、このモデルを使うことにより、都市の適切な利用水量の計画や消防出動台数の計画、さらには土地利用の変更による火災危険度の減少効果を検討することができることを示した。

第2編では、地震時防災計画のための方法論を提示するとともに、都市防災施設および土地利用計画について、事例研究を行ない、その妥当性および有効性を示した。すなわち、第1編で得られた研究成果に基づいて火災危険度を定義し、さらに意志決定理論による地震時防災計画の定式化を行なった。そして、これを耐震防火水槽の整備計画に適用した例、すなわち、耐震防火水槽の設置数を決定する方法に関する研究成果を示した。最後に、土地利用を変更することにより地震、水害、斜面崩壊の危険度を軽減させる方法について検討し、従来の都市の機能論的な計画手法に加えて防災的見地を含めた土地利用の計画手法について論じた。各章で得られた成果を結論的に、述べると以下のとおりである。

第2章では、意志決定理論における決定樹木分析の手法を応用することにより、地震時火災に限定した防災計画の1つとして、耐震防火水槽を整備して消防力を強化する場合における最適な防火水槽数を求めるための定式化が可能となることを明らかにした。また、防災施設の整備によって、トータルリスクが減少することのほかに、土地利用の整備によ

っても、これが減少することを示し、土地利用の適切な再配置を行なうことは被害軽減対策となりうることを示した。

第3章では、地震時火災によるリスクおよび地震時火災危険度を定義し、従来の研究と比較検討した。従来のC.Scawthorn による地震時火災危険度の予測手法は、地震の被害を確率・統計的に研究した優れたものであり、その概要を示した。この特徴は、火災の延焼に関しては、浜田・堀内の式を用いて、焼失戸数を求めるものであるが、延焼阻止に関しては全くの仮定をしている。そこで、筆者は第1編の延焼阻止モデルを、地震時火災危険度の予測モデルに組み入れて、C.Scawthorn の手法を発展させ、新たに地震時火災危険度および地震時火災によるリスクを定義した。これにより、消防力の効果を考慮した実際の地震時火災の被害が予測できることを示した。

第4章では、防火水槽数の最適水準を大阪市を対象としたケーススタディを行なった結果、トータルリスクが最小となる防火水槽数は100㎡水槽を整備する場合、4基/メッシュ（約16基/ km²）、40㎡の場合は8基/メッシュ（約32基/ km²）となった。これは、東京都における設置基準と同じ結果となったが、この東京都の算定基準が、1つの防火水槽でメッシュを覆うことができるとした、いわば十分条件であるのに対し、本章の算定モデルによる配置数は、経済的な側面から費用を最小にするための必要条件である。大阪市または東京都と同等の都市においては、4基/500mメッシュ（約16基/ km²）の100㎡防火水槽を整備することが、必要かつ十分な対策と考えられ、この設置基準により防火水槽を整備することの重要性を指摘した。

第5章では、災害の危険性をはじめとする各環境項目の評価値とその許容値の差をできる限り小さくしようという観点から、目標計画法によるモデルによって得られた土地利用再配置計画の方法論を示した。この土地利用再配置計画モデルによるケーススタディを通じて、地域全体として好ましい土地利用計画案が得られることが判明した。従来の土地利用の再配置計画は、直感的な図形的表現で行なわれていたが、これを客観的に表現する基礎を確立した。

参 考 文 献

謝 辞

あ と が き

参考文献

- 1) 東京都防災会議：東京都地域防災計画（震災編）昭和55年修正、東京都都民生活局広報部都民資料室、1980
- 2) 田治米辰雄、望月利男、松田磐余：地盤と災害、槇書店、1977
- 3) 消防庁：消防白書、昭和57年版、1982.11
- 4) 水野弘之：地震時出火に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1978
- 5) 保野健治郎、高井広行、難波義郎：火災延焼についての一考察、第10回安全工学の発展、PP. 83～84、1980.6
- 6) 保野健治郎、高井広行、難波義郎：震災に関する住民意識に関する一考察、土木学会中国四国支部学術講演概要、PP.267～268、1981.5
- 7) 保野健治郎、高井広行、難波義郎：住宅地区における防災意識に関する一考察、土木学会年次講演概要集IV、PP.59 ～ 60、1981.10
- 8) 保野健治郎、高井広行、難波義郎：震災時における都市防災施設の最適配置と最適交通運用に関する研究（文部省科学研究費一般研究B研究報告書）、近畿大学工学部建築学科防災研究室、1981.3
- 9) 東京消防庁防災部：震災対策の現況、東京消防庁、1977.3
- 10) 関沢愛：住宅火災の出火・拡大延焼に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1978
- 11) 東京消防庁防災部：消防水利の対策と実務、東京連合防火協会、1979.8
- 12) 消防庁：消防年報、NO.30、1981
- 13) 消防庁消防課：改訂消防力・消防水利の基準解説、全国加除法令出版、1978
- 14) 保野健治郎、難波義郎：建物火災の延焼と消防水利に関する一考察、日本火災学会研究発表会梗概集、PP.101～102、1981.5
- 15) 佐々木弘明：道路幅と延焼速度（Ⅱ）、日本建築学会学術講演梗概集、PP.1271 ～ 1272、1976.10
- 16) 鈴木清太郎、金原寿郎：大火災時における延焼に就て、応用物理、VOL.9NO.10、PP. 451 ～ 454、1939
- 17) 土佐林忠夫：村松火災について、日本損害保険協会火災技術部、1947
- 18) 東京消防研究会：火災に於ける延焼速度、PP. 2 ～ 14、1942
- 19) 菱田厚介：火災危険度の算定（地区率について）、日本損害保険協会、1954

- 20) 浜田稔：火災の延焼速度式について、火災の研究、PP. 35～ 44 、相模書房、1951
- 21) 堀内三郎：都市の消防施設に関する研究、京都大学学位論文、1961
- 22) 保野健治郎：水道を中心とした都市防火施設に関する研究、京都大学学位論文、1968
- 23) 保野健治郎、高井広行、難波義郎：建物火災の延焼に関する基礎的研究、日本火災学会論文集VOL.32NO.1、PP.23 ～ 32 、1982
- 24) 保野健治郎、高井広行、難波義郎：ロジスティック 曲線による建物火災の延焼速度式に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集NO.311、PP.137～144 、1982
- 25) 山下邦博他：実家屋群の燃焼及び延焼について、日本火災学会研究発表会梗概集、PP.3～4 、1980
- 26) 自治省消防庁消防研究所：実家屋群による大規模火災対策の研究調査報告書、1980
- 27) 田辺国土：統計的データの誤差の処理、b i t 臨時増刊（数値計算における誤差）、共立出版、PP.113～125 、1975
- 28) 赤池弘次：情報量基準A I Cとは何か、数理科学、NO.153、サイエンス社、1976
- 29) N.R.ドレーバー他：応用回帰分析、PP.261～ 296、森北出版、1968
- 30) 田辺国土：非線形最小2乗法のアルゴリズム、応用統計学、VOL.9NO.3、PP.119～140、1980
- 31) 柏木力：医学統計解析、朝倉書店、1980
- 32) Donald.W.Marquardt：An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters,J.Soc.Indust.Appl.Math.,VOL.11,NO.2,PP.431 ～441,1963
- 33) 刀根薫：B A S I C、PP.137～146 、培風館、1981
- 34) 富士通：F A C O M F O R T R A N S S L I I 使用手引書、PP.196～201 、1980
- 35) 保野健治郎、高井広行、難波義郎、遠木律夫：定差図法による建物火災の延焼速度式（ロジスティック 曲線）に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集NO.325、PP.155～164 、1983.3
- 36) 大阪府消防課：消防施設の根底、1940
- 37) 平山崇：火災時の風速、建築雑誌、1935.4
- 38) 保野健治郎、高井広行、難波義郎：建物火災の放水による延焼阻止効果に関する基礎的研究、日本火災学会論文集VOL.32NO.2、PP. 15～ 23 、1982.12
- 39) 碓井憲一：建物火災に対する消火注水量の実状分析、日本火災学会論文集、VOL.1NO. 2、PP.52 ～54、1951

- 40) 碓井憲一：消火注水量合理値の例題的解析（第1報）、日本火災学会論文集、VOL.2 NO.2、PP.58 ～60、1952
- 41) 碓井憲一：消火注水量合理値の例題的解析（第2報）、日本火災学会論文集、VOL.3 NO.3、PP.27 ～29、1953
- 42) 碓井憲一：消火注水量合理値と実使用消火水量との関係、日本火災学会論文集、VOL.4 NO.2、PP.49 ～51、1955
- 43) 前掲 19)
- 44) 堀内三郎：都市の消防施設に関する研究、京都大学学位論文、1961
- 45) 保野健治郎：水道を中心とした都市防火施設に関する研究、京都大学学位論文、1968
- 46) 高橋哲：クリブモデル火災の消火諸現象の定量化、日本火災学会論文集、VOL.29NO.1、PP.33 ～40、1979
- 47) 高橋哲：木材火災の消火－注水中の重量加速度および消火時間－、日本火災学会論文集、VOL.30NO.1、PP.31 ～40、1980
- 48) P.Fucks,P.G.Seeger：Ein mathematisches Modell zur Bestimmung der Löschwasser-menge und Vergleich mit Experimenten,VFDB,NO.30,PP.3 ～ 9 , 1981
- 49) 消防庁消防課：改訂消防力・消防水利の基準解説、全国加除法令出版、PP. 25～39、1978
- 50) Kunio Tanabe,Sumie Ueda :NOLLS1,A Fortran Subroutine for Nonlinear Least Squares by a Quasi-Newton Method,Computer Science Monographs,Institute of Statistical Mathematics , 1981
- 51) 保野健治郎、難波義郎：建物火災の延焼と消防水利に関する一考察、日本火災学会研究発表会梗概集、PP.101～102 、1981
- 52) C.Scawthorn 、山田善一、家村浩和、小林正美：都市による地震火災危険度の予測に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集NO.313、PP.138～144 、1982
- 53) 大阪市総合計画局：大阪市メッシュ・データ集、1976
- 54) 大阪市消防局：消防に関する都市等級調査報告書、1981
- 55) 大阪市消防局：大阪市消防年報、1975～1981
- 56) 震災対策研究会：大規模地震対策特別措置法の概説、全国加除法令出版、1979
- 57) 黒田勝彦：耐震防災計画と設計の基礎、「都市の耐震防災」（昭和55年度土木学会関西支部講習会テキスト）、PP.111～126 、1980

- 58) Katsuhiko Kuroda : Introductory Lectures on Statistical Decision Theory and Application to Reliability-based Design ,Unpublished Textbook at Kyoto Univ., 1982
- 59) 黒田勝彦：統計的決定理論と統計的品質管理の理論、「データ処理と確率統計マニュアル」（昭和57年度土木学会関西支部講習会テキスト）、PP. 70～ 82 、1982
- 60) C.Scawthorn 、山田善一、家村浩和、小林正美：都市による地震火災危険度の予測に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集N0.313、PP.138～144 、1982
- 61) 水野弘之：地震時出火に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1978
- 62) C.Scawthorn ：“ Urban Seismic Risk:Analysis and Mitigation” ,Dissertation of Kyoto Univ.,1981
- 63) C.Scawthorn 、山田善一、家村浩和、小林正美：都市による地震火災危険度の予測に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集N0.313、PP.138～144 、1982
西支部講習会テキスト）、PP.111～126 、1980
- 64) 水野弘之：地震時出火に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1978
- 65) 片山恒雄：宮城県沖地震にみる都市型震災の特徴、土木学会誌Annual'79、PP.5～7 、1979
- 66) 水野映正、池田春雄：防火水槽整備の現況と問題、PP 63～73、空気調和・衛生工学 Vol.55 No.9 、1981
- 67) 東京消防庁防災部：消防水利の対策と実務、東京連合防火協会、1979.8
- 68) C.Scawthorn ：“Urban Seismic Risk:Analysis and Mitigation” ,Dissertation of Kyoto Univ.,1981
- 69) C.Scawthorn 、山田善一、家村浩和、小林正美：都市による地震火災危険度の予測に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集N0.313、PP.138～144 、1982
- 70) 堀内三郎、水野弘之：地震時の出火率と住家全壊率の関係について、日本建築学会論文報告集、N0.247、1976
- 71) 堀内三郎、水野弘之：地震時の出火件数の予測に関する研究、日本建築学会論文報告集、N0.250、1976
- 72) 水野弘之：地震時出火に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1978
- 73) 消防庁消防課：改訂消防力・消防水利の基準解説、全国加除法令出版、PP. 25～39、1978

- 74) 大阪市総合計画局：大阪市メッシュ・データ集、1976
- 75) 長尾義三：土木計画序論、PP.104～108、共立出版、1972
- 76) 薄雲秀則他：局所手続きによる局面／曲線フィッティングプログラム、京都大学大型
計算機センター利用の手引き－プログラムライブラリ編－、PP. 94～101、1980
- 77) 本多誠司：防災を考慮した土地利用計画に関する考察、京都大学卒業論文、1983
- 78) 三菱総合研究所：メッシュデータ分級評価調査報告書、1979
- 79) 長尾義三、若井郁次郎、林恒一郎：環境インパクトをもつプロジェクト周辺地域の整
備計画手法、土木学会論文報告集、第 243号、PP. 61～ 70、1975
- 80) 福村平一：環境影響を考慮した工場群周辺整備計画に関する基礎的研究、京都大学大
学院修士論文、1978
- 81) S.M. リー：意志決定のための目標計画法（上）、日本経営出版会、1974
- 82) 福川忠昭：目標計画法（3）、オペレーションズ・リサーチ、Vol.20、NO.4、PP 51～ 56、1975
- 83) 福川忠昭：年度予算と多目的計画法、オペレーションズ・リサーチ、Vol.28、NO.10、PP 11～ 17、
1983
- 84) 福川忠昭、山口俊和：比率目標を含む目標計画法について、OR学会春季研究発表会予
稿集、PP. 24～ 25、1983
- 85) 土木学会関西支部：都市施設計画の総合評価と住民参加、昭和54年講習会テキスト、1979
- 86) 志水清孝：多目的と競争の原理、共立出版、PP. 30～ 68、1982

謝 辞・あとがき

この論文は多くの方々の御指導と御援助のもとに出来あがったものである。

論文をまとめるにあたり、京都大学教授長尾義三先生には多くの有益な示唆と親身ある御指導を戴いた。ここに記して衷心より感謝の意を表します。

筆者がまがりなりにも本論文をまとめることができたのは、多くの御教示と御指導を戴いた関西大学教授（京都大学名誉教授）堀内三郎先生、近畿大学教授保野健治郎先生並びに京都大学助教授黒田勝彦先生の薫陶のたまものである。あわせて感謝する次第である。

近畿大学助教授高井広行先生には共同研究を通じて御指導を戴いた。また、研究の過程で近畿大学工学部建築学科防災研究室並びに京都大学工学部交通土木工学教室起終点講座の学生・大学院生諸氏その他多くの方々の援助と協力を得ている。とくに、第2編第5章の計算は、京都大学大学院本多誠司君の協力に負うところが大きい。さらに、大阪府消防防災課島田耕一氏をはじめ多くの自治体の方々から資料の提供等の便宜を計って戴いた。ともに記してお礼を申しあげる次第である。

本論文は、筆者が現在在職する近畿大学工学部建築学科防災研究室において昭和52年以来行ってきた建物火災の延焼速度式および放水による延焼阻止効果の研究を基礎として地震時の都市防災施設計画に関する研究をまとめたもので、すでに一部は土木学会、日本建築学会および日本火災学会等に報告している。筆者のこの研究は、冒頭に述べた研究目的に対しては、一応の成果を修めることができたと思われるが、未だその一部分に過ぎないものであって今後ますます諸先生、諸先輩の御指導を得て研究を続けてゆく所存である。この研究が我国の都市防災計画に、多少なりとも貢献することができれば望外の幸せである。